

공학박사 학위논문

열 · 유체 시스템 해석용 고해상 다차원 이미징
측정법의 개발

Developments of High-Resolution Multi-Dimensional
Imaging Techniques for Analyses of Thermal · Flow
Systems

지도교수 김 의 간

2005년 월 일

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

황 태 규

본 논문을 황태규의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장	공학박사	조 효 제	인
-----	------	-------	---

위 원	공학박사	박 권 하	인
-----	------	-------	---

위 원	공학박사	정 재 현	인
-----	------	-------	---

위 원	공학박사	강 신 영	인
-----	------	-------	---

위 원	공학박사	김 의 간	인
-----	------	-------	---

2005년 월 일

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

Developments of High-Resolution Multi-Dimensional Imaging Techniques for Analyses of Thermal · Flow Systems

by
Tae Gyu, Hwang

Department of Mechanical Engineering
Graduate School Korea Maritime University

Abstract

The multi-dimensional imaging techniques such as, 4D PTV, SPIV, SPTV, FSIMS, Panoramic PIV and 2D PIV have been developed or constructed for the measurements of the flows not only to provide databases for fundamental researches in engineering and industrial applications, but also to provide better design guides for thermal-fluid flow systems. The purpose of the study is to develop multi-dimensional imaging techniques that can provide quantitative three-dimensional vector fields over the whole measurement volumes in thermal flows.

A new 4-dimensional particle tracking velocimetry (4D PTV) has been developed using three high-resolution-high-speed cameras(1k x 1k, 2000fps), and it was used to measure spatial vector fields of a sphere

($d=30\text{mm}$) wake. The Reynolds number is 1,113. Measurements with a Stereoscopic PIV(SPIV) and a Stereoscopic PTV(SPTV) were carried out under the same experimental conditions in order to compare those results obtained by the three measurement techniques. Further, measurement uncertainty analyses were carried out for the 4D PTV system, and it was confirmed that the uncertainties of the constructed 4D PTV system for the three components(U , V , W)of the velocity vector were $\pm 1.2\text{mm}$, $\pm 1.6\text{mm}$ and $\pm 1.6\text{mm}$, respectively.

In 4D PTV measurement, more than 5,000 instantaneous correct vectors were able to be measured by the system and they were interpolated onto the three-dimensional cell grids to obtain physical properties of the wake. A experimental database on turbulent properties such as turbulent kinetic energy and Reynolds stress over the whole measurement volume have been constructed and some features of the wake have been evaluated. The Strouhal number (St) was obtained at $x/D=1.53$, $y/D=0.53$ and $z/D=0.03$ through FFT analysis using the instantaneous velocity vectors and its value was 0.19, which showed good agreements with those of the previous researches. An eigenvalue analyses was carried out to get temporal evolution of the wake structures using the grids vectors. Separation could be seen on the circumference of the sphere and the separated flow was recirculated near $x/D=2.5$ toward the sphere. It was verified from the 4D PTV, SPIV and

SPTV measurements that the sphere wake has a two-shells-structure that consists of the inner shell (vortex core part) and the outer shell (vortex loop part). The outer shell, vortex loop, was convected downstream rotating clockwise and counterclockwise with some irregular time interval. The inner shell looked like a hair pin shape. The axis of this hair pin appeared vertically and horizontally alternatively with some regular time intervals. It is thought that the velocity profiles of the sphere wake has strong relations with a spiral motion of the vortices that were shedded from the surface of the sphere.

The constructed 4D PTV system was also applied to the measurements of an impinged jet flow. The distance between the nozzle exit and the rigid flat plate, $x/D=7.0$ for the nozzle diameter $D=20\text{mm}$. The Reynolds number is 40,000. More than 7,000 instantaneous three-dimensional velocity vectors were measured by the system. A ring vortex was clearly reconstructed by the obtained velocity vectors. The location of the ring vortex, $0.9D$ from the plate, was at reasonable positions. The thickness of the ring vortex was about $0.8D$. The results showed that the sweeping velocity of the ring vortex over the surface of the impinged plate was about 20msec. It seems that the ring vortex appears periodically and shows a squeezing motion in horizontal and in vertical with some intervals. Some prerequisite features that the

hardware of 4D PTV system should have been investigated regarding to Kolmogorov's time and length scales.

Due to the wide range of applicabilities of the impinged jet that has a phenomenon of fluid-to-flexible-structure interactions, A measurement system that can capture simultaneously the motions of an elastic flat plate and the motions of the flows impinged onto that flexible plate has been constructed. The flow-structure interaction measurement system (FSIMS) consists of four cameras, two(0.5k x 0.5k) are for the measurements of the flow fields and two(1.0k x 1.0k) are for the measurements of the motions of the plate.

For the measurements of the flow fields, the GA-3D PTV algorithm has been used. For the measurements of the motions of the flexible plate, a new measurement algorithm called 'bidirectional tracking algorithm' has been developed. The performances of this algorithm have been tested using a set of artificial images of which data had been obtained by a theoretically generated plate's virtual motion and by an actual experiment. Further, its performances were also compared with that of a commercial measurement system through an actual test on the motions of a 6-degree-of-freedom platform. The measurement uncertainty of the motion tracking system were $\pm 1.2\text{mm}$, $\pm 1.6\text{mm}$ and $\pm 1.6\text{mm}$ for x, y and z, respectively, which implies 1~2 % relative error

for the whole measurement volume size.

The jet flow coming from the nozzle diameter ($D=15\text{mm}$) was impinged onto the flexible plate. The injection of the jet was made upward from the bottom of a water tank by opening the valve installed under the nozzle. The Reynolds number with the nozzle diameter is 20,000. The flexible plate ($t=0.5\text{mm}$, $d=400\text{mm}$) is made of silicon and the distance between the nozzle and the flexible plate is $x/D=4.0$. To make clear visibility of the targets which were attached onto the surface of the silicon plate and were used for the motion tracking, a violet light was used.

It could be seen from the measurement results and from experimental experiences that the direction of the flexible plate's motion was just the opposite of the jet direction at the first stage of the jet's spouting. The vortices came from the stagnation point at the flexible plate had a tendency of separating relatively far away from the separation location of the case of rigid plate ($r/d=1.0\sim 1.5$).

In order to make maximum use of the benefits of the above multi-dimensional imaging techniques onto engineering and industrial applications, a Panoramic PIV which can be regarded as a revision of the 4D PTV system has been developed and applied to the measurements of the air flows of the air-conditioning system of a

building model. In this experiment, it has been verified that the similarity between models and the practical one are not dependant on Reynolds numbers but on mass flow rates, especially over $Re=1,000$. Further, 2D PIV measurement on the freezing room of a refrigerator was carried out for finding the best conditions of the room not to be frosted. It revealed that the freezing of water droplets decreased largely when the chance of meeting of the cooled air vented from the cooling coil was made rare with the air in circulation regions like the room corners.

The experimental data on the sphere obtained by 4D PTV, SPIV and SPTV can be used for the studies from fundamental to applications in engineering fields. The measurement data on the impinged jet obtained by 4D PTV can also be used for the theoretical studies of the physics of the vortex separations from the impinged plate, which will help develop a better physical model for CFD research area. The database on the flow-elastic-structure interaction that has been obtained by the FSIMS will open a new era in the research activities on the FSI problems appearing in various engineering fields. The experimental results obtained by a Panoramic PIV and a 2D PIV on the practical engineering applications, on a building air-conditioning ventilating system and on a refrigerator, can be a good guide for best applications of the imaging techniques into thermal-flow systems.

목차

Abstract	i
List of Tables	x
List of Figures	xi
Nomenclature	xvii
제 1 장 서론	
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	8
1.3 연구내용	9
제 2 장 계측법의 원리	
2.1 3D PTV	12
2.2 3D PTV에서의 유전알고리즘	20
2.3 스테레오 PIV/PTV	28
제 3 장 고해상 4D PTV의 구축	
3.1 연구배경	35
3.2 고해상 카메라의 필요성	36
3.3 4D PTV의 필요성	40
3.4 3D PTV와 SPIV/SPTV에서의 계측오차의 불확실성	43
3.4.1 4D PTV에서의 교정	44
3.4.2 SPIV/SPTV에서의 교정	49
3.5 유체-구조 연동운동 동시측정시스템	
3.5.1 계측법의 원리	57
3.5.2 양방향 운동 추적 알고리즘의 검증	60
3.5.3 유체-구조 연동운동 동시측정시스템의 평가	90

3.6	결과해석을 위한 오차 제거 및 물리량 해석법	
3.6.1	오차 제거	107
3.6.2	고유치 해석	110
 제 4 장 구 후류 유동장 해석		
4.1	연구배경	116
4.2	실험방법 및 절차	119
4.3	실험결과	132
4.3.1	4D PTV 측정결과	134
4.3.2	스테레오 PIV 측정결과	
4.3.2.1	평균 유동장 해석	146
4.3.2.2	평균 물리량 해석	152
4.3.2.3	순시 유동장 해석 및 유동구조 분석	167
4.3.3	스테레오 PTV 측정 결과	173
4.3.3.1	평균 유동장 해석	175
4.3.3.2	평균 물리량 해석	181
4.3.3.3	순시 유동장 해석 및 유동구조 분석	186
4.4	결론	192
 제 5 장 충돌 제트 유동 해석		
5.1	연구배경	195
5.2	실험방법	197
5.3	실험결과	199
5.4	결론	208
 제 6 장 3차원 유체-구조 연동운동 동시 측정 시스템의 구축		
6.1	연구배경	209
6.2	실험방법	210

6.3 실험결과	216
6.4 결론	223
제 7 장 건축물 공조시스템 실내기류 측정	
7.1 연구배경	225
7.2 실험방법	226
7.3 실험결과	234
7.4 결론	240
제 8 장 냉장고 실내 기류 측정	
8.1 연구배경	242
8.2 빙결	
8.2.1 빙결의 메커니즘	244
8.2.2 냉동실 유동 특성과 빙결현상	245
8.3 실험방법	247
8.4 실험결과	251
8.5 결론	260
제 9 장 결론	261
참고문헌	266
<참고자료>	277

List of Tables

Table 2.1 Definition of chromosome with respect to camera.	21
Table 3.1 Relative errors for camera parameter in air.	47
Table 3.2 Relative errors for camera parameter in water.	48
Table 3.3 Plane calibrator's information for SPIV/SPTV.	51
Table 3.4 Error analysis of each calibrator for SPIV/SPTV.	56
Table 3.5 List of index and explanation for each of it.	67
Table 3.6 Absolute coordination of calibrator's header.	75
Table 3.7 Virtual camera parameters of each centroid tracking method.	77
Table 3.8 Uncertainty analysis for each centroid tracking method of virtual camera's parameter.	77
Table 3.9 Uncertainty analysis of motion tracking for each centroid tracking method.	85
Table 3.10 Motion Calibration Measurement Data.	89
Table 3.11 Hydraulic condition of the cylinder.	95
Table 3.12 Uncertainty of FSIMS	106
Table 3.13 Rejection values for THOMPSON'S TAU	109
Table 3.14 Relations between vortex core and λ_2 .	113
Table 7.1 Specification of three models.	231
Table 7.2 Experimental conditions for models.	231
Table 8.1 Volume flow measurement.	258

List of Figures

Fig. 2.1 Image plane rotation process	18
Fig. 2.2 Relations between absolute and camera's coordinate system.	19
Fig. 2.3 Definition of 3-D particle position.	19
Fig. 2.4 Concept of 3D PTV using GA Algorithm.	26
Fig. 2.5 Flowchart of 3D PTV using GA Algorithm.	27
Fig. 2.6 Angular displacement's lens array.	31
Fig. 2.7 Scheimpflug's lens array.	31
Fig. 2.8 Schema of SPIV.	32
Fig. 2.9 Schema of SPTV.	33
Fig. 2.10 Definition of 3-D particle position.	34
Fig. 3.1 Schema of LES and DNS.	38
Fig. 3.2 Eulerian concept for 4D PTV.	39
Fig. 3.3 Comparison of the conventional 3D PTV vs. 4D PTV.	42
Fig. 3.4 Pin typed calibrator.	45
Fig. 3.5 Pin typed calibrator in air.	40
Fig. 3.6 Pin typed calibrator in water.	46
Fig. 3.7 Image for camera calibration.	51
Fig. 3.8 Plane calibrator's for SPIV/SPTV.	52
Fig. 3.9 Schema of mirror reflection system for calibration under the water.	53
Fig. 3.10 Plane calibrator 1 (air / camera angel 30°).	54
Fig. 3.11 Plane calibrator 1 (water / camera angel 30°).	54
Fig. 3.12 Plane calibrator 1 (air-mirror / camera angel 30°).	55
Fig. 3.13 Plane calibrator 1 (water-mirror / camera angel 30°).	55
Fig. 3.14 Flowchart of FSIMS.	58
Fig. 3.15 Concept of Bidirectional Tracking algorithm.	59

Fig. 3.16 Pin typed calibrator.	75
Fig. 3.17 Real calibrator's image for virtual camera 1 and camera 2.	76
Fig. 3.18 Virtual plate image of each virtual cameras.	78
Fig. 3.19 Virtual plate image for Virtual camera 1 and camera 2 by 1 frame.	78
Fig. 3.20 Virtual plate motion by frame.	79
Fig. 3.21 Motion tracking results of the virtual plate with each method.	81
Fig. 3.22 Virtual particles on the virtual silicon plate and Pink circle is marked for motion tracking.	82
Fig. 3.23 Result of motion tracking of each points.	85
Fig. 3.24 6 Degree motion tracking system by Krypton.	86
Fig. 3.25 Targets of motion tracking for verification of Bidirectional Motion Tracking algorithm.	86
Fig. 3.26 Calibrator image for motion tracking.	87
Fig. 3.27 Result of temporal motions of the four targets. in Sway.	88
Fig. 3.28 Measurement system of verification of 3D FSIMS.	94
Fig. 3.29 Calibrator for cameras.	95
Fig. 3.30 Configuration of the vertical floating cylinder.	96
Fig. 3.31 Picture of floating structure for motion measurement.	96
Fig. 3.32 Images of the measurements of structure motion.	97
Fig. 3.33 Images of flow fields.	97
Fig. 3.34 Mean velocity distribution and sampling point (-20, -170, 0).	98
Fig. 3.35 Temporal evolutions of 3D vectors measured by 3D PTV at x, y, z = (-20, -170, 0).	98
Fig. 3.36 Temporal motions of the four targets under the wave generator frequency 1.33 Hz.	99
Fig. 3.37 Instantaneous flow structures at the second-mode motion.	100
Fig. 3.38 Instantaneous flow structures at the highest-peak motion.	100

Fig. 3.39 Virtual calibration images of virtual camera using real camera parameters.	101
Fig. 3.40 Virtual experimental images of virtual camera using real 3D FSIMS's data.	101
Fig. 3.41 Structure motion image between real camera and virtual camera.	102
Fig. 3.42 Flow field images of the real camera and the virtual camera.	103
Fig. 3.43 Structure motion field results obtained in the cases of real and virtual images.	105
Fig. 3.44 Flow field results obtained in the cases of the real image and the virtual image.	106
Fig. 3.45 The range of stability or unstability using eigenvalue.	115
Fig. 4.1 Mean velocity profile of inlet.	120
Fig. 4.2 Inlet condition at the circular water tank.	121
Fig. 4.3 Schema of 4D PTV system.	124
Fig. 4.4 Schema of SPIV/SPTV at xy plane.	125
Fig. 4.5 Schema of SPIV/SPTV at yz plane.	126
Fig. 4.6 4D PTV System.	127
Fig. 4.7 Calibrator image for 4D PTV.	128
Fig. 4.8 SPIV/SPTV system at xy plane.	129
Fig. 4.9 Calibrator image for SPIV/SPTV at xy plane.	129
Fig. 4.10 SPIV/SPTV system at yz plane.	130
Fig. 4.11 Calibrator image for SPIV/SPTV at yz plane.	131
Fig. 4.12 Instantaneous image of each cameras. (4D PTV)	132
Fig. 4.13 Instantaneous image of each cameras and each section. (SPIV/SPTV)	133
Fig. 4.14 Measurement coordinate.	136

Fig. 4.15 Results of sphere wake flow using 4D PTV.	137
Fig. 4.16 Temporal evolution of the Cone-shape(C-shape) vortical structure.	138
Fig. 4.17 Vorticity distribution each section (60 fps).	140
Fig. 4.18 The mean velocity vector of yz plane.	141
Fig. 4.19 Dimensionless velocity profiles at each section.	142
Fig. 4.20 Dimensionless velocity of 3D PTV [Hwang].	143
Fig. 4.21 Sampling point. ($x/D=2.90$, $y/D=0.77$, $z/D=-0.03$)	144
Fig. 4.22 C-shape becomes S shape by the outer flows.	144
Fig. 4.23 Temporal evolution of velocity components.	145
Fig. 4.24 Mean velocity distribution of SPIV at each section.	152
Fig. 4.25 Physical quantity of SPIV at xy section.	161
Fig. 4.26 Physical quantity of SPIV at yz section. ($x/D=1.0$)	164
Fig. 4.27 Physical quantity of SPIV at yz section. ($x/D=2.5$)	167
Fig. 4.28 Sampling point for time history.	168
Fig. 4.29 Time history at each section.	171
Fig. 4.30 Result of FFT analysis for SPIV.	173
Fig. 4.31 Mean velocity distribution of SPTV at each section.	174
Fig. 4.32 Velocity distribution of SPTV at each section.	180
Fig. 4.33 Physical quantity of SPTV at xy section.	183
Fig. 4.34 Physical quantity of SPIV at yz section. ($x/D=1.0$)	184
Fig. 4.35 Physical quantity of SPIV at yz section. ($x/D=2.5$)	185
Fig. 4.36 Sampling point for time history.	187
Fig. 4.37 Time history at each section.	190
Fig. 4.38 Result of FFT analysis for SPTV.	192
Fig. 5.1 4D PTV system for the impinged jet flow.	198
Fig. 5.2 Impinged jet flow image of each camera.	201
Fig. 5.3 Instantaneous spatial vectors.	202

Fig. 5.4 Temporal history of 3D-velocity vectors. ($x/D=5.6$, $y/D=-2.0$, $z/D=0.0$).	203
Fig. 5.5 Instantaneous spatial distribution of eigenvalue at 5% vs the whole λ_2 ranges ($t=t_0$)	203
Fig. 5.6 Time history of vorticity distribution.	204
Fig. 5.7 Instantaneous spatial distribution of eigenvalue at 5% vs the whole λ_2 ranges.	204
Fig. 5.8 Temporal evolution of velocity component. (at $x/D=5.9$, $y/D= 1.4$, $z/D= -0.1$, step= 0.5 msec)	206
Fig. 5.9 Temporal evolution of velocity components. (at $x/D= 5.8$, $y/D= 2.4$, $z/D= 0$, step= 10 msec)	206
Fig. 5.10 Temporal changes of the vortex ring structures sampled at the times figured on Fig. 5.9.	207
Fig. 6.1 Overall measurement system.	211
Fig. 6.2 Scene of experimental setup.	211
Fig. 6.3 Scene of camera calibrations.	213
Fig. 6.4 Images of the two calibrators used for the four cameras.	214
Fig. 6.5 Image of tracking targets on the surface of the flexible plate.	215
Fig. 6.6 Used target images for motion tracking.	215
Fig. 6.7 Raw images at the same instance.	217
Fig. 6.8 Measured motion field with time changes. (single open case)	218
Fig. 6.9 Measured flow field of the impinged jet.	218
Fig. 6.10 Measured motion field with time changes. (multiple open case)	220
Fig. 6.11 Measured flow field of the impinged jet.	220
Fig. 6.12 Measured motion field with time changes. (single opened case)	221
Fig. 6.13 Measured flow field of the impinged jet.(at 148 frame)	221
Fig. 6.14 Distribution of turbulent kinetic energy at the top positions.	223
Fig. 7.1 Experimental setup.	230

Fig. 7.2 Experimental setup views.	230
Fig. 7.3 Calibrator images.	232
Fig. 7.4 Panoramic image of the calibrator.	232
Fig. 7.5 Experimental images.	233
Fig. 7.6 Experimental panoramic image.	233
Fig. 7.7 Mean velocity vector distributions.	235
Fig. 7.8 Turbulence kinetic energy distributions.	236
Fig. 7.9 Mean velocity vector distributions.	237
Fig. 7.10 Turbulence kinetic energy distributions.	238
Fig. 7.11 Turbulence properties at points.	239
Fig. 8.1 Mechanism of freezing at the refrigerator.	245
Fig. 8.2 Measurement system.	249
Fig. 8.3 Measurement sections.	250
Fig. 8.4 Experimental images for each section.	252
Fig. 8.5 Results at Section 4-1.	253
Fig. 8.6 Results at Section 7-1.	253
Fig. 8.7 Results at Section 8-1.	255
Fig. 8.8 Mean velocity field at the Section 5 with the lamp house.	255
Fig. 8.9 Three-dimensional flow patterns in the upper room.	257
Fig. 8.10 2D Flow patterns of the original louver.	257
Fig. 8.11 Volume flow measurement system.	258

Nomenclature

$3DE$	Fitness for 3-D position of particle
A_i	Coefficient of area moment
B, B_{ii}	Inverse matrix of M
C	Fitness for continuous fluid of vector
c, c_X, c_Y	Distance from view point to imaging sensor of camera
D, D_s, D_e	Error of calculated 3-D position of particles
D_i	Divergence of velocity
dis	Distance of projection
D_M	Thresholding value of D_i
d_p	Diameter of particle to make a virtual image.
F	Equation of observation for x-direction
G	Equation of observation for y-direction
I	Intensity of particle to make a virtual image
I_0	Maximum intensity of particle to make a virtual image.
k_1, k_2	Lens coefficient
M_M, M_x, M_y, M_z	Rotation matrix
m_X, m_Y	Movement value of principle point Movement value of principle point
o	Original point of photographic coordinate system
O	Original point of absolute coordinate system
p	Particle on images
P	Particle in space

RUV	Reynolds shear stress($-\overline{u'v'}/U_0^2$)
RVW	Reynolds shear stress($-\overline{v'w'}/U_0^2$)
RWU	Reynolds shear stress($-\overline{w'u'}/U_0^2$)
S^*	Standard deviation
TKE	Turbulence kinetic energy($\frac{1}{2} \overline{q^2} / U_0^2$)
TIU	Turbulence intensity($\sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$)
TIV	Turbulence intensity($\sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$)
TIW	Turbulence intensity($\sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$)
$\triangle X, \triangle Y$	Lens distortion value
$\overline{x}, \overline{y}$	Center point of particle
X_0, Y_0	Deviation of the principal point from the center of image
X_i, Y_i	Value of the photographic position of particle
x, y, z	Absolute coordinate system
X, Y, Z	Photographic coordinate system
x_0, y_0, z_0	Center of projection
x_i, y_i, z_i	Value of the 3-D position of particle
x_m, y_m, z_m	Rotated absolute coordinate system
\overline{X}	Mean

Greek characters

α, ω	Tilted angle for X axis
β, ψ	Tilted angle for Y axis
γ, κ	Tilted angle for Z axis
–	Time averaged value

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

열·유체 유동장에 대한 유동해석이 어려운 것은 유동장에 내재되어 있는 다양한 크기의 와(vortex)들이 공간에 걸쳐서 서로 얹혀있는데다가 시간의 변화에 따라서도 그 공간분포가 시시각각 변화하는 것에 기인한다. 와의 유동에 대한 연구는 오랜 세월에 걸쳐서 이어져 오고 있으나 아직 온전한 해에는 도달하지 못하고 있다. 와의 유동에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔는데, 기상학에서는 와도 전달방정식의 해가 이론적인 기상예보의 기초가 되었으며, 음향학 분야에서의 공기역학적인 음향의 발생 이론도 비정상 유동의 와유동 해석에 기초하고 있다. 이외에도 자연계에서는 모든 크기의 와동들이 내재하고 있는데, 초유체인 액체 헬륨 내의 양자화된 와동에서부터 은하의 회전에까지 이르는 우주의 와동이 존재하는 것으로 알려져 있다.

와유동에 대한 보다 근접한 해를 찾아내어 이를 공학적으로 이용하는 것은 모든 공학 분야에서 주요관심사가 되어 왔으며 Navier-Stokes 방정식의 발견 이래로 와유동에 대한 연구는 가속되어 왔다. 특히, 컴퓨터의 발명과 이의 성능향상은 와유동 해석에 보다 정밀한 접근을 가능하게 하였으며 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics)의 비약적인 발전을 도래시켰다. 그리하여 보다 작은 스케일(scale)의 와유동에 대한 수치적 모사(numerical simulation)의 구현은 모든 공학도와 과학도들에게는 현실적으로

그 가능성을 시사하였다. 최근의 나노(nano), 마이크로(micro), 바이오(bio) 유동분야에서의 비약적인 연구 집중현상은 컴퓨터의 용량과 성능이 미소스케일의 와유동 해석이 가능할 만큼 향상되었기 때문이다.

하지만, 아무리 컴퓨터 성능향상에 의한 수치적 모사가 가능하게 되었다 할지라도 만물을 구성하는 물질의 분자 1몰에 6.023×10^{23} 개의 분자 하나하나의 거동을 정확히 추정해 되지 못하는 한, 수치해석에 의한 극미세계에의 연구와 도전은 공학적으로는 현실성이 떨어진다고 하겠다. 즉, 가장 미소단위의 원자 하나하나의 거동을 추정하는 것에 의미를 두기 보다는 매크로(macro) 스케일의 거동을 정량적으로 파악하여 이를 공학적으로 응용하는 것이 보다 현실적인 추세에 있어왔다. 그런 연유로 수치적 접근에 의한 열·유체유동장의 해석분야에서는 현실적으로 비용과 시간적 측면에서 유리한 모델링(modeling)해석에 주력하여 왔다. 난류유동해석분야에서 수치이론적 접근방법인 $k-\epsilon$ 모델, 대규모 와유동 모사(LES, large scaled eddy simulation) 등이 거기에 해당된다. 최근에는 직접수치모사(DNS, direct numerical simulation)에 의한 와유동의 상세한 거동 해석이 행해지고 있으나 전술한 바와 같이 분자 개별운동까지 모사(simulation)가 가능할 정도의 컴퓨터가 출현되지 않는 한 산업현장에서 실용적인 고레이놀즈 수의 유동장에 대한 완전한 해석이 가능하지 못하는 단계에 있다. 결국 수치적 해석에 의한 열·유체 유동장 해석에의 접근은 수치이론적 모델링에 의존할 수밖에 없는 상황이라 할 수 있다.

한편, 공학 및 산업현장에서 찾아 볼 수 있는 대부분의 열·유체 유동장은 고레이놀즈 수일뿐만 아니라 유동장을 지배하는 초기 및 경계조건도 매우

다양하여 수치이론적 모델링에 의한 완벽한 해석은 현실적으로 불가능한 관계로 초기조건 및 경계조건을 보다 단순화한 형태에 대한 결과를 이용하는 경우가 허다하다. 즉 수치이론적 모델링 결과는 실제 현상과는 일치하지 않는 경우가 많으며 실험적 측정해석은 이러한 관점에서 매우 중요한 역할을 한다.

열·유체 유동장에 대한 실험적 측정해석법에는 프로브(probe), 열선유속계(hot wire), 레이저도플러 유속계(LDV, laser doppler velocimeter) 등이 있어왔으나 이들은 점계측(pointwise measurement)인 관계로 열·유체 유동의 대표적 현상인 비정상(unsteadiness)성을 측정할 수가 없다. 비정상성에 대한 측정해석의 난점을 극복하기 위하여 개발된 측정법이 입자영상유속계(PIV, particle image velocimetry)이다⁽¹⁾. 이 측정법은 유동장에 동일한 밀도의 미소입자를 투입하여 이들의 거동을 가시화(visualization) 및 영상화(image)한 다음 이들 영상에 대하여 디지털영상처리를 수행함으로써 미소입자들의 거동, 즉 유동장의 속도장을 정량적으로 얻어낼 수 있는 것으로 오늘날 거의 모든 공학분야에서 기존의 점계측법을 대신하고 있다. 이 PIV측정법은 유동장에 방해를 주지 않고 유동장의 2차원 및 3차원 속도벡터장 정보를 제공할 수 있는 동시다점측정(simultaneous-multi point measurement) 방법이라는 점에서 지속적으로 각광을 받아 이어갈 것으로 추정되고 있다.

PIV측정법은 측정영역에 나타난 입자영상 밀도에 따라 저밀도 PIV와 고밀도 PIV로 구분한다. 저밀도 PIV를 PTV(particle tracking velocimetry)라고 하며 고밀도 PIV를 그냥 PIV라고 한다⁽¹⁾. PIV에서는 입자영상 밀도가 높을 경우 입자들에 대한 개별구분이 어려워 미소조사영역(interrogation

window) 내의 입자군의 밝기정보패턴의 이동량 계산에 의하여 속도장을 얻어내는 관계로 미소조사영역 크기의 대표속도, 즉 공간평균속도를 얻어낸다고 할 수 있는 반면에, PTV에서는 입자들의 개별구분이 가능하여 입자 개별에 대한 중심(center) 이동량 계산에 의하여 속도장을 얻어내는 관계로 질점의 속도를 얻어낸다고 할 수 있다⁽²⁾. PIV와 PTV의 이와 같은 특징으로부터 PTV에 의한 결과는 PIV에 의한 결과보다 시간변동성분을 보다 정확하게 측정할 수 있다는 장점이 있는 반면에 얻어지는 속도벡터수가 PIV에 의한 것보다 상대적으로 적은 관계로 유동의 상세구조분석에는 불리한 것으로 알려져 왔다⁽³⁾.

한편, 산업현장에서 찾아볼 수 있는 대부분의 유동장이 3차원성이 강한 관계로 3차원 측정에 관한 필요성의 대두와 함께 개발된 측정법이 스테레오 PIV(SPIV, stereoscopic PIV)⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾이다. SPIV에서는 임의 두개의 2차원단면상의 레이저광원으로 가시화한 측정영역에 대하여 두 대 카메라로 영상화한 다음 이들 두 영상에 스테레오정합의 원리⁽⁴⁾를 적용함으로써 2차원 단면 내에서 out-of-plane성분 즉 w성분을 측정해낸다. 도와 황⁽⁷⁾은 표준영상⁽⁸⁾을 이용하여 2차원 PIV에 의한 결과는 SPIV에 의한 결과보다 실제 유동과 거리가 있음을 밝힘으로써 3차원 측정의 필요성을 확인하였다. SPIV는 계산원리상 PIV에 기초를 두고 있는 관계로, 즉 전술한 바와 같이 공간평균속도를 얻어내는 관계로 시간변동성분에 대한 측정 정도는 PTV에 기초한 것보다 낮다고 할 수 있다. 도 등⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾은 SPIV의 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 PTV에 기초한 SPTV(stereoscopic PTV)법을 개발하였으며 이어진 연구⁽¹¹⁾에서는 SPTV가 SPIV보다 시간변동성분측정에 그 측정성능이 우수하

다는 사실을 밝혔다. 그런데 SPIV와 SPTV는 여전히 2차원 단면상에서의 3차원 속도성분을 측정하는 것이므로 유동의 공간구조해석은 측정원리상 불가능하다. 원래, 공간상에서 개별입자들의 구분이 가능한 PTV기반의 3D PTV⁽¹²⁾⁽¹³⁾가 개발되었으나 개발당시의 하드웨어 시스템성능(저해상 카메라, 고가의 영상처리장비, 저속의 컴퓨터) 한계에 기인한 측정알고리즘의 성능한계로 순간속도벡터 획득수가 적었던 관계(300개 전후)로 유동의 공간구조 해석에는 도달하지 못하였다. 이후 조⁽¹⁴⁾와 Doh 등⁽¹⁵⁾은 하드웨어시스템의 성능향상에 힘입어 순간속도벡터 획득수를 동일 카메라해상도로 기존의 10배 이상(3000개 전후) 향상시킨 유전알고리즘기반의 3D PTV(genetic algorithm based 3D PTV: GA-3D-PTV)를 개발한 다음 이를 실린더후류 측정에 적용 후류의 2차와(secondary vortex)구조에 대한 거동 해명에 성공함으로써 3D PTV의 산업현장에서의 적용 가능성을 제시하는 계기가 되었다. 황⁽¹⁶⁾ 및 도 등⁽¹⁷⁾은 GA-3D-PTV를 이용한 구의 후류 유동장 측정해석을 통하여 구후류의 대규모 와구조에 대한 시간적 거동 해명에 성공하였다. 위의 두 연구를 계기로 3D PTV의 공학 및 산업분야에서의 실용적 적용의 발판을 마련하게 되었다.

유동장에 대한 가장 이상적인 3차원 측정법으로서 홀로그래피 PIV(HPIV, holographic PIV)법이 있는데 이 측정법은 측정의 원리상 상기의 SPIV, SPTV, 3D PTV보다 유동장의 훨씬 정밀한 유동구조, 즉 유동장의 Kolmogorov 스케일(scale)까지 측정 가능하지만 하드웨어시스템의 복잡성, 장시간의 데이터처리문제, 공간해상도 향상에 따른 실시간 측정의 어려움 등으로 실용성이 많이 떨어진다. 결국 유동장의 공간구조의 시간변화에

따른 거동측정에는 현실적으로 3D PTV가 유일한 측정수단이라 할 수 있다.

3D PTV가 실용화 단계에 이르렀지만 공학의 다양한 분야에까지 활용되지 못한 것은 측정된 순간속도벡터의 수가 Kolmogorov 시간 및 공간스케일까지 측정 가능할 정도까지 미치지 못했기 때문이었으나, 가장 최근에는 Kolmogorov 스케일까지 측정이 가능할 수 있는 고해상 고속카메라가 등장하게 되었다. Hwang 등⁽¹⁸⁾은 Kolmogorov 스케일 수준까지 측정 가능한 3D PTV측정시스템을 구축하여 이를 충돌분류 유동장의 와거동 측정해석에 성공함으로써 이른 바 4D PTV측정시스템 구축의 발판을 마련하였으나 방대한 실험 데이터의 해석 결과를 통한 4D PTV 측정시스템의 유효성 최종검정은 이어지는 연구과제로 남겼다. 이들이 충돌분류를 측정의 대상으로 삼았던 것은 산업분야에 있어서의 실용성에 의거한 것인데, 이는 충돌분류가 열전달 분야⁽¹⁹⁾ 및 물질전달(mass transfer)에 유리한 유동특성을 지닌 사실에 의거한다. 즉, 충돌분류는 종이표면의 코팅 및 금속의 표면도금⁽²⁰⁾에 이용되고 있을 뿐만 아니라 폭발물 검출이나 금지약품 검출을 위해 사용되는 화학약품의 샘플을 채취하거나 청결하기 위한 목적으로 물체표면상의 미립자를 추출하는데 이용되고 있다⁽²¹⁾. 이처럼 충돌분류는 대규모 산업기계분야에서부터 소규모 기초실험 응용분야에까지 그 활용도가 다양하리만큼 많은 공학자들의 응용연구 대상이 되어왔다. Hwang 등⁽¹⁸⁾은 전술한 바와 같이 Kolmogorov 스케일까지 측정이 가능한 시스템의 구현에는 성공하였으나 이를 보다 실질적 산업현장에 적용이 가능한 형태로의 시스템구축에의 필요성을 떨치지 못했다. 다시 말하면, 산업현장에서 많이 이용되고 있는 충돌분

류 유동장은 분출되는 유동 자체의 특성뿐만 아니라 충돌된 분류판의 운동이 분출된 유동과 연동된 형태로 나타나는 관계로 이에 대한 정확한 이론적 해석은 물론이거니와 실험적 측정 자체도 불가능하였다는 점으로부터 유체-구조 연동운동 측정시스템 구축의 필요성을 제기하고 있었다.

지금까지 충돌분류와 관련된 대부분의 연구는 충돌판이 딱딱한 평판이라는 조건으로 수행되어 왔는데 충돌판의 탄성을 무시하지 못할 경우에는 고체평판조건에서의 해석결과는 무의미하게 되고 만다. Ellen과 Tu⁽²⁰⁾는 탄성체판에 충돌분류를 이용하여 금속을 코팅시키는 공정에서 코팅의 균일성이 압력뿐만 아니라 전단응력분포와 관계됨을 밝혔는데 탄성체판의 진동이 내재될 경우 충돌분류와 판과의 유체-구조 연동운동은 코팅의 질을 결정짓는 주요요인이 될 수밖에 없다. 일반적으로 분류의 경우는 레이놀즈수가 300이상이면 난류로 됨은 잘 알려진 사실인데 산업분야에 적용되는 대다수의 분류가 난류영역에 해당된다⁽¹⁹⁾. 난류분류 자체에 대해서는 아직도 이론적으로나 수치계산으로도 완전하게 모사하기가 어려운 대상으로 남아있는 상황에서 컴퓨터의 획기적 성능향상이 이루어진다고 하더라도 탄성판에 충돌되는 분류에서의 유체-구조 연동(flow-structure interaction: FSI)문제를 3차원 수치모사하는 일은 더욱 더 불가능에 가까운 현실이다.

FSI문제를 다루기 위해서는 유체운동에 대한 지배방정식과 구조물운동에 대한 지배방정식이 동시에 연립되어 풀어져야 하며 유체와 고체의 경계에 있어서의 역학적 구속조건이 적용되어야 한다. 일반적으로 유체운동에 대한 지배방정식의 결과를 구조물 지배방정식에 대입한 후, 이를 풀게 된다. 이러한 과정을 반복 수행함으로써 유체지배방정식과 구조물지배방정식을 커플해

서 풀 수 있다. Choi⁽²²⁾는 두 개의 지배방정식을 하나의 변분방정식으로 정리함으로써 구조운동방정식을 풀 때 요하게 되는 구조표면에 가해지는 유체력 계산을 하지 않아도 되도록 하는 음해법이 보다 안정적임을 보고하였으며 Hu 등⁽²³⁾, Hu⁽²⁴⁾ 및 Choi 와 Joseph⁽²⁵⁾은 유체-구조 연동문제에 대하여 하나의 지배방정식으로 다루어 이론적 접근을 시도하였지만 이들을 검정할 만한 실험적 연구보고는 거의 없는 상황이다.

도 등⁽²⁶⁾은 FSI문제를 실험적으로 해결하기 위한 측정시스템, FSIMS(flow-structure interaction measurement system)을 개발하였는데, 이들은 해양구조물의 운동과 구조물 주위의 유동장에 대하여 3차원 동시측정이 가능한 시스템을 구축하여 이를 직립형 부유실린더 운동장의 측정해석에 적용하였다. 이들은 구조물의 운동이 유체의 운동 즉 점성력으로 인하여 비선형성 운동모드(nonlinear mode)를 지니게 됨을 밝혔는데 이는 3D PTV기반의 유체-구조물의 연동운동 측정해석의 가능성을 제시한 계기가 되고 있지만 이에 대한 방대한 실험적 검증절차를 필요로 하는 상황에 있다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 열·유체시스템에서 흔히 나타나는 유동장에 대한 고정밀도로 비접촉식 측정해석이 가능한 다차원 이미징 측정법의 구축, 검증 및 응용을 연구의 최종목표로 삼고 있다.

먼저, 3D PTV기반의 4D PTV측정시스템을 구축한 다음 이를 이용한 구후류에 대한 방대한 측정실험결과와 동일 유동장에 대한 SPIV 및 SPTV에

의한 측정결과와의 비교를 통하여 구후류 유동장에 대한 실험해석 데이터베이스의 구축 및 충돌분류 유동장에서의 대규모 와구조 거동해석에 관한 측정정보고를 연구목적의 하나로 삼고자 한다.

다음으로, 3D PTV기반의 유체-구조 연동운동 동시측정시스템(FSIMS)을 구현한 다음, 이를 탄성체 충돌분류 유동장에 대한 방대한 실험측정해석을 수행하는 것을 연구의 또 다른 목적으로 삼고자 한다. 아울러 FSIMS에 대한 측정성능검정 및 평가를 통하여 측정시스템의 상용화를 위한 기초적 자료를 구축하고자 한다.

끝으로 실제 산업현장에서 적용되고 있는 열·유체기기의 성능평가 및 개선을 위하여 이미징(imaging) 측정법을 적용하고자 하는 것을 연구의 마지막 목적으로 삼고자 한다. 구체적으로는 파노라마 PIV측정법의 구현을 통하여 건축물 공조시스템에서의 실내기류 측정결과로부터 이미징 측정법을 이용한 건축물 실내기류 측정에서의 실용성 확인 및 유의사항을 정리하고자 하며, 나아가 실제 운전중인 냉장고 내부의 기류측정을 수행함으로써 이미징 측정법에 의한 냉장고 내의 결빙현상을 제거하고자 하는 것을 연구의 목적으로 삼고자 한다.

1.3 연구내용

3D PTV기반의 4D PTV측정시스템을 구축한 다음 이를 구의 후류 유동장에 대한 데이터베이스를 구축한다. 동일 유동장에 대한 SPIV 및 SPTV측정을 통하여 얻어진 결과와 4D PTV에 의한 결과와의 정량적 및 정성적 비

교평가를 수행한다.

공학적 응용가치가 높은 충돌분류에 대한 4D PTV측정으로부터 4D PTV측정시스템이 갖추어야 할 시간 및 공간해상도에 관한 고찰을 수행함과 동시에 충돌판 근처에서 발생하는 와환(vortex ring)의 시간 연속적 거동 측정 결과를 보고한다.

다음으로, 3D PTV기반의 유체-구조 연동운동 동시측정시스템(FSIMS)을 구현하여 이에 대한 성능평가 및 검증을 수행한 다음, 이를 이용하여 탄성판 충돌분류의 유동장에 대한 측정해석을 수행함으로써 유동과 탄성 충돌판과의 상호연동운동에 대한 실험적 데이터베이스를 구축 보고한다.

또한, 파노라마 PIV(panorama PIV)측정법을 개발 구현하여 공학응용분야에서 가치가 높은 건축물 공조시스템에서의 실내기류측정에 적용하여 2대 카메라 이미징 측정법을 이용한 건축물 실내기류 측정에서의 실용성 확인 및 유의사항을 정리하고, 한 대 카메라 이미징 측정법에 의한 실 운전상태의 냉장고 내부에 대한 기류측정 수행을 통하여 냉장고 내의 결빙현상에 대한 정량적 평가 및 성능개선에 관한 사항을 보고한다.

끝으로, 4D PTV, SPIV, SPTV측정법의 공학 기초분야에의 적용에 해당되는 구후류 유동장, 충돌분류 유동장, 탄성판 충돌분류 유동장 측정을 통하여 각 유동장에 대한 데이터베이스를 구축한 결과들을 요약하고, 파노라마 PIV, 2D PIV측정법의 공학 응용분야에의 적용에 해당되는 건축물 실내기류 측정해석결과와 실 운전상태의 냉장고 내부 기류측정을 통한 냉장고 내부의 빙결현상 저감 결과에 대한 요약을 통하여 다차원 이미징 측정법의 공학적 의의를 밝힌다.

본 논문은 크게 9장으로 구성된다.

1장은 서론으로 다차원 이미징 측정법의 필요성과 연구배경 및 목적에 관한 내용을 다루고 있으며, 2장과 3장에서는 다차원 이미징 측정법의 이론과 측정법의 평가 및 성능검정에 관한 내용을 담고 있다.

4장, 5장과 6장은 다차원 이미징 측정법의 공학기초분야에로의 적용연구에 관한 내용을 담고 있는데 구의 후류 유동장, 충돌분류 유동장 및 탄성판 충돌분류 유동장에 대한 다차원 이미징 측정실험과정 및 결과에 관한 내용을 담고 있다.

7장과 8장에서는 다차원 이미징 측정법의 공학응용분야에로의 적용연구에 관한 내용을 담고 있는데 이미징 측정법에 의한 건축물 실내기류 유동에 대한 측정실험과정 및 결과와, 실 운전상태의 냉장고 실내기류 측정실험과정 및 결과에 관한 내용을 담고 있다.

마지막으로 9장은 결론으로써 다차원 이미징 측정법의 공학기초 및 응용 분야에의 적용결과들에 대한 내용을 담고 있다.

<참고자료>에서는 PIV/PTV의 계측불확실성을 평가하여 수록하였다.

제 2 장 계측법의 원리

2.1 3D PTV

카메라를 통한 3차원 공간의 정량적인 인식을 위해서는 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하며, 이 카메라의 정보를 결정하는 것을 단사진 표정이라 한다.

카메라 정보와 카메라로부터 얻은 영상은 카메라 중심점에 대한 투영의 관계가 성립된다. 이러한 원리로부터 Kobayasi 등⁽²⁷⁾, Doh 등⁽¹³⁾⁽²⁸⁾은 외부요소 ($x_0, y_0, z_0, \omega, \psi, \kappa$)와 내부요소 (c, X_0, Y_0, k_1, k_2)등 11개 요소를 가지는 관측방정식을 사용하였으나, 본 논문에서는 Doh 등⁽¹⁵⁾이 제시한 외부요소($dis, \alpha, \beta, \gamma, m_X, m_Y$)와 내부요소 (c_X, c_Y, k_1, k_2)등 10개의 요소를 가지는 관측방정식 (2.1) 을 사용하여 유전알고리즘에 적용하였다.

Fig. 2.1 은 10개 표정요소를 이용하기 위해 절대 좌표계(x, y, z)에 대한 카메라 좌표계(X, Y, Z)의 관계를 보여 주고 있으며, dis 는 절대 좌표계 $O(0, 0, 0)$ 점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. 즉 O 점으로부터 카메라중심까지의 거리를 말한다. 카메라 좌표계와 절대 좌표계를 일치시키기 위해 x, y, z 축에 대한 회전각을 각각 α, β, γ 로 정의하면, 축에 대한 회전형렬은 $M_m = M_z M_y M_x$ 가 된다. 즉 x, y, z 축 회전에 의해 카메라

좌표계의 Z 축과, 절대 좌표계의 z 축이 평행하게 되며, 다시 $z(y)$ 축 회전에 의해 카메라 좌표계의 X, Y 축과 절대좌표계의 x, y 축이 서로 평행하게 된다. 이렇게 회전된 절대 좌표값을 (x_m, y_m, z_m) 으로 표시하고, 카메라의 Z 축과 절대좌표계의 z 축을 일치시키기 위한 이동량을 m_X, m_Y 으로 표시한다. 이렇게 카메라의 Z 축과 절대좌표계의 z 축을 일치시키면, Fig. 2.2 와 같은 카메라의 XY 평면과 절대 좌표계 사이의 투영관계가 성립된다. 즉 절대좌표계의 대상점과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선조건으로부터 다음과 같은 관측방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} X &= c_X \frac{x_m - m_X}{\sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2 - z_m^2}} + \Delta X \\ Y &= c_Y \frac{y_m - m_Y}{\sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2 - z_m^2}} + \Delta Y \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서 c_X, c_Y 는 이미지 그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 것이며, $\Delta X, \Delta Y$ 는 이미지 중심으로부터의 거리에 따른 렌즈에 의한 굴절을 고려하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= \frac{X}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \Delta Y &= \frac{Y}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4), \quad r = \sqrt{X^2 + Y^2} \end{aligned}$$

식 (2.1)과 같이 정의된 각 카메라의 표정요소를 구하기 위해 이미 알고 있는 3차원 좌표 (x_i, y_i, z_i) 와 사진좌표 (X_i, Y_i) 에 대해 F, G는 다음과 같은 식 (2.2)과 (2.3)으로 표현된다.

$$F = c_X \frac{x_m - m_X}{\sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2 - z_m^2}} - (X - \Delta X) = 0 \quad (2.2)$$

$$G = c_Y \frac{y_m - m_Y}{\sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2 - z_m^2}} - (Y - \Delta Y) = 0 \quad (2.3)$$

이러한 F, G방정식은 비선형 연립방정식이므로 이를 풀기 위하여 초기에 표정요소의 미지값을 가정하고 테일러 급수전개에 의한 최소자승법으로 보정량을 구하여 수렴될 때까지 근사치를 보정하는 수정 Gauss-Newton법을 사용하였다.

한편, 카메라의 표정요소가 구해지면 사진좌표 (X, Y) 와 절대좌표 (x, y, z) 간에 식 (2.2)와 (2.3) 으로부터 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\frac{c_X(x_m - m_X)}{d - z_m} - (X - \Delta X) = 0 \quad (2.4)$$

$$x_m = \frac{(X - \Delta X)}{c_X} (d - z_m) + m_X$$

$$\frac{c_Y(y_m - m_Y)}{d - z_m} - (Y - \Delta Y) = 0 \quad (2.5)$$

$$Y_m = \frac{(Y - \Delta Y)}{c_Y} (d - z_m) + m_Y$$

여기서, $d = \sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2}$ 이다. $d - z_m = t$ 라 두면,

$$\begin{aligned}
x_m &= \frac{X - \Delta X}{c_X} t + m_X \\
y_m &= \frac{Y - \Delta Y}{c_Y} t + m_Y \\
z_m &= d - t
\end{aligned} \tag{2.6}$$

이 된다. 회전변환행렬을 M_m 이라 두고, 역행렬을 B 라 두면,

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = M_m \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = M_m^{-1} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}$$

이므로 x, y, z 에 관해 정리하면,

$$\begin{aligned}
x &= B_{11}x_m + B_{12}y_m + B_{13}z_m \\
&= \left(B_{11} \frac{s_X}{c_X} + B_{12} \frac{s_Y}{c_Y} - B_{13} \right) t + (B_{11}m_X + B_{12}m_Y + B_{13}d) \\
y &= B_{21}x_m + B_{22}y_m + B_{23}z_m \\
&= \left(B_{21} \frac{s_X}{c_X} + B_{22} \frac{s_Y}{c_Y} - B_{23} \right) t + (B_{21}m_X + B_{22}m_Y + B_{23}d) \\
z &= B_{31}x_m + B_{32}y_m + B_{33}z_m \\
&= \left(B_{31} \frac{s_X}{c_X} + B_{32} \frac{s_Y}{c_Y} - B_{33} \right) t + (B_{31}m_X + B_{32}m_Y + B_{33}d)
\end{aligned} \tag{2.7}$$

이 되며, 카메라의 위치 (x_0, y_0, z_0) 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
x_0 &= B_{11}m_X + B_{12}m_Y + B_{13}d \\
y_0 &= B_{21}m_X + B_{22}m_Y + B_{23}d \\
z_0 &= B_{31}m_X + B_{32}m_Y + B_{33}d
\end{aligned} \tag{2.8}$$

여기서, $d = \sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2}$ 이고, $s_X = X - \triangle X$, $s_Y = Y - \triangle Y$ 를 나타낸다. 이로부터 각 카메라에 대한 카메라중심(x_0, y_0, z_0)과 입자의 중심을 지나는 하나의 직선의 방정식을 구할 수 있으며, 하나의 입자에 대한 두 대 이상의 카메라로부터 구해진 직선방정식을 공선의 조건을 이용하여 구하게 된다. 즉, Fig. 2.3 에서 보이는 바와 같이 P점에 대해 각각의 카메라는

$$P(x, y, z) = P(a_1t + x_0, a_2t + y_0, a_3t + z_0) \tag{2.9}$$

와 같은 직선의 방정식을 가진다.

두 개 직선의 방정식을 다음과 같이 표시하면

$$A(x, y, z) = A(a_{11}t + b_{11}, a_{12}t + b_{12}, a_{13}t + b_{13}) \tag{2.10}$$

$$B(x, y, z) = B(a_{21}s + b_{21}, a_{22}s + b_{22}, a_{23}s + b_{23}) \tag{2.11}$$

와 같다. 이 두 직선에 대한 최단거리를 가지는 t, s 는 다음과 같다.

$$t = \frac{\gamma - \alpha\beta}{1 - \alpha^2}, \quad s = \frac{\gamma\alpha - \beta}{1 - \alpha^2} \quad (2.12)$$

여기서, $\alpha = a_{11}a_{21} + a_{12}a_{22} + a_{13}a_{23}$

$$\beta = a_{11}(b_{11} - b_{21}) + a_{12}(b_{12} - b_{22}) + a_{13}(b_{13} - b_{23})$$

$$\kappa = a_{21}(b_{11} - b_{21}) + a_{22}(b_{12} - b_{22}) + a_{23}(b_{13} - b_{23}) \quad \text{이다.}$$

t, s 가 구해지면 $A(x, y, z), B(x, y, z)$ 가 결정되어 진다. 여기서, 실제 $P(x, y, z)$ 값은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (2.13)$$

각 입자에 대해 위와 같은 과정을 거치면 대응하는 카메라간의 입자와 하나의 3차원 위치를 결정할 수 있게 된다.

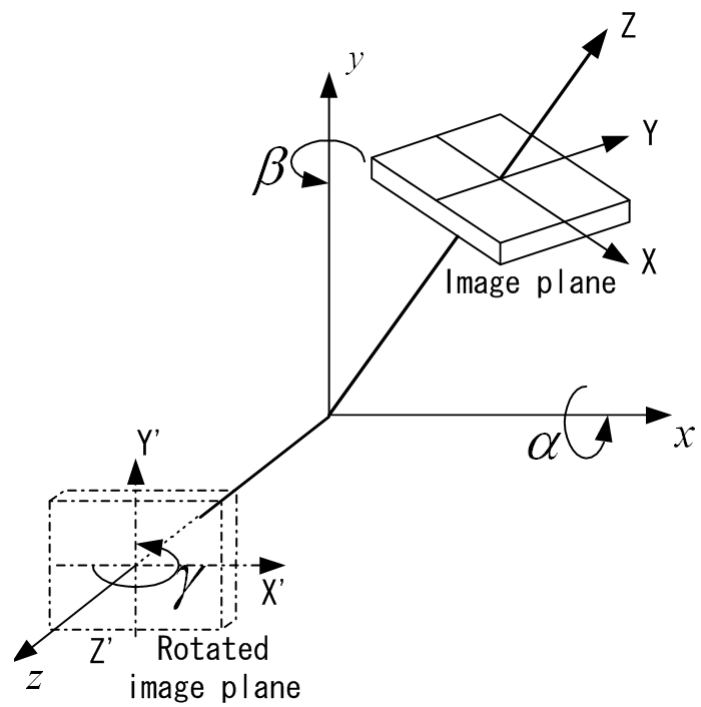


Fig. 2.1 Image plane rotation process

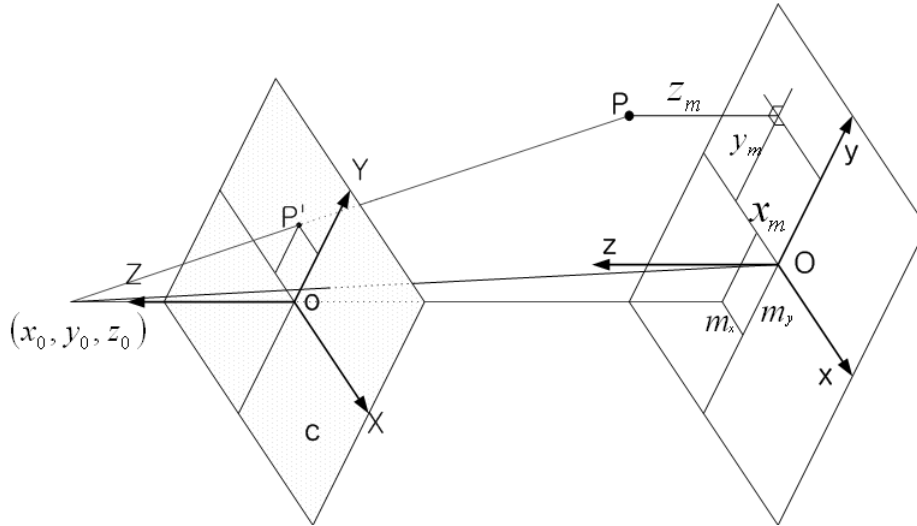


Fig. 2.2 Relations between absolute and camera's coordinate system.

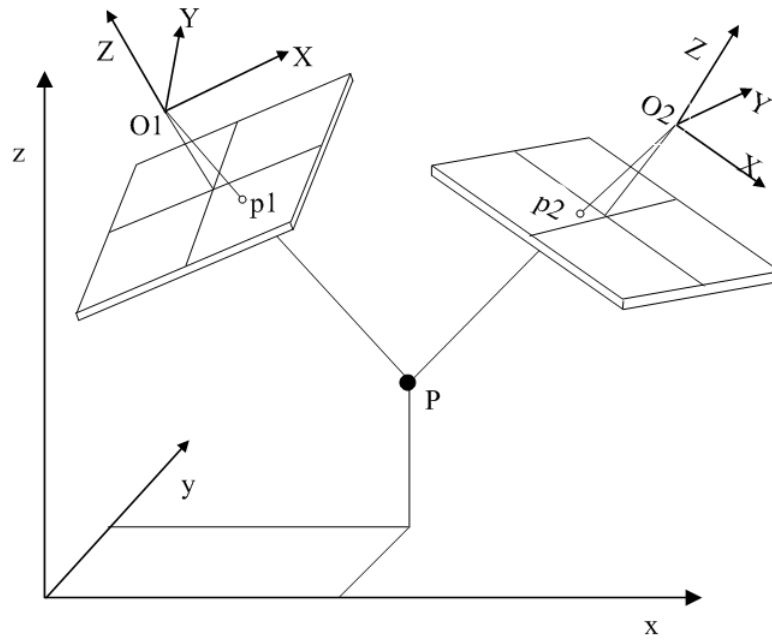


Fig. 2.3 Definition of 3-D particle position.

2.2 3D PTV에서의 유전알고리즘

일반적으로 3차원 위치 결정시 2대의 카메라로부터 입력된 영상을 기준으로 하여 입자에 대한 공선의 조건식에서 오차가 제일 작은 입자들을 같은 입자라고 인식하게 된다. 이는 입자의 수가 비교적 적을 경우에 잘 맞으며 실제 입자가 많아질 경우 입자에 대한 카메라 중심으로부터의 직선은 다른 카메라에서 하나의 직선으로 나타나게 되고, 이 직선과 만나는 입자들의 개수도 증가하게 된다. 따라서 조그만 입자중심의 오차에도 완전히 다른 결과를 얻게 된다. 이러한 잘못된 결과를 수정하기 위해 같은 입자를 인식하는 과정에 최적화 알고리즘 중 하나인 유전알고리즘을 적용하였다.

3차원 속도벡터는 시점과 종점으로 구성되어 있으며, 시점과 종점 모두 카메라 두 대로부터 동일 입자로 인식되는 공간좌표이므로 카메라의 입장에서 2개의 시점과 2개의 종점을 가지게 된다. 이것을 유전알고리즘의 염색체로 정의하여 Table 2.1에 나타내었으며, 카메라에 대한 시점과 종점은 각 영상에 대한 입자의 중심값을 나타내는 정수값이고, 3D Error는 공선의 조건식에서 두 직선간의 최단거리를 나타낸다. 즉 하나의 입자에 대한 3차원 위치 결정시 오차는 식 (2.14)와 같고, 3차원 속도 벡터에 대한 위치 결정시 오차는 식 (2.15)와 같이 표현된다.

Table 2.1 Definition of chromosome with respect to camera.

Camera 1		Camera 2		Fitness Function	
Start Point	End Point	Start Point	End Point	3D Error	Continuity

$$D = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2} \quad (2.14)$$

$$3DE = [D_s + D_e] \quad (2.15)$$

단, D_s : 3차원 속도벡터의 시점의 오차

D_e : 3차원 속도벡터의 종점의 오차

각 카메라에서 획득한 입자의 시점과 종점은 전체 유동장의 최대 이동거리를 초과하지 못하므로, 시점을 기준으로 하여 카메라에 대한 2차원 벡터가 될 수 있는 후보들을 결정한 다음 초기에는 임의적으로 여러 개의 후보 중하나를 벡터로 선택하는 과정을 카메라 두 대에서 획득한 영상에 대해 실행한 후, 임의적으로 결정된 두 개의 2차원 벡터를 선택하여 3차원 벡터를 만든다. 이렇게 결정된 3차원 벡터는 시점과 종점에 대한 공간상의 $3DE$ 값을 가지게 되며, 이렇게 생성된 집단을 이용하여 여러 가지 유전연산자를 반복 적용함으로써 원하는 결과에 최적화시킨다.

유전알고리즘에서 목적함수는 해의 방향을 결정하는 것으로 가장 중요한 요소이며, 이를 위해 국소영역 안에서 유체는 연속의 식을 만족해야 한다는

조건으로부터 PIV에서의 오류벡터의 검출을 위해 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned}
\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f &= \frac{-3u(i, j) + 4u(i+1, j) - u(i+2, j)}{2\Delta x} \\
\left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f &= \frac{-3v(i, j) + 4v(i, j+1) - v(i, j+2)}{2\Delta y} \\
\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b &= \frac{u(i-2, j) - 4u(i-1, j) + 3u(i, j)}{2\Delta x} \\
\left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b &= \frac{v(i, j-2) - 4v(i, j-1) + 3v(i, j)}{2\Delta y}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

PIV에서 구해진 속도로부터 식 (2.16)을 이용하여 하나의 속도벡터를 기준으로 한 주어진 4영역의 속도 발산치는 식 (2.17)와 같으며, 이러한 4개의 정보를 이용하여 오류벡터를 판정하게 된다.

$$\begin{aligned}
D_1 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f \right| & D_2 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right| \\
D_3 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right| & D_4 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f \right|
\end{aligned} \tag{2.17}$$

대칭인 2조의 영역속도 발산치 (D_1, D_3) 혹은 (D_2, D_4)는 임의의 역치 D_M 을 초과하게 되면 오류벡터라고 판단된다. 그러나 판정조건의 성질상 복수의 정보를 사용하기 때문에 오류벡터에 인접한 정상벡터를 이상치로 오판하거나, 와류가 발생하는 부분 등과 같이 흐름의 변화가 큰 곳에서는 정상벡터를 이상치라고 오판할 가능성이 높다. 이러한 오판정을 최대한 줄이기 위

해 4영역 중에서 속도의 변화량이 최소로 되는 영역만을 고려하고 이 영역이 흐름의 연속성을 만족하는지의 여부를 판정하는 식 (2.18)와 같은 방법을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} &= \text{Min} \left\{ \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f, \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b \right\} \\ \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} &= \text{Min} \left\{ \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f, \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right\} \\ \therefore D(i, j) &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} \right| \end{aligned} \quad (2.18)$$

즉 $D(i, j)$ 가 역치값 D_M 을 넘는 경우 오류벡터라고 판정하게 되며, 식 (2.18)를 식 (2.19)으로 수정하여 3차원에 적용하였다.

$$D(i, j, k) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial w}{\partial z} \right]_{\min} \right| \quad (2.19)$$

그러나, 유전알고리즘을 사용한 PTV 계측에서 초기에 모든 속도값이 임의적으로 가정되어지며, 일정한 격자를 갖지 않기 때문에 속도변화치가 상대적으로 컸으므로, 연속의 식을 적용하기 위해 판단하고자 하는 벡터의 시점과 종점이 가까운 주위의 10개의 벡터를 선택하였다. 이는 경험적으로 선택영역이 좁으면 알고리즘의 수렴에 충분한 영향을 주지 못하고, 선택영역이 넓으면 주위의 에러벡터 영향이 커짐을 확인하였기 때문이다.

PTV에서는 벡터와 벡터사이에 어떤 일정한 간격이 존재하지 않으므로

차분식은 1차식으로 표현하였으며, 최종적으로 적합도는 다음과 같이 정의하였다.

$$C = \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{\min} + \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right|_{\min} + \left| \frac{\partial w}{\partial z} \right|_{\min} \quad (2.20)$$

의미상 주위 벡터와 속도 변화량이 제일 작은 즉 벡터가 연속의 식을 만족하는 정도에 따라 주위 벡터와 유사한 분포를 가지면 C는 작은 값을 가지며 상대적으로 그렇지 못한 개체들의 C는 높은 값을 가지게 된다.

아울러 3DE와 C가 낮은 개체들이 높은 적합도를 가지게 되며, 적합도는 유전연산자들에 의해 사용되어지고, 적합도를 둘로 나눈 것은 이러한 적합도가 서로 다른 역할을 하기 때문이다.

본 연구에서는 유전연산자로 격리(isolation), 이주(migration), 교배(crossover) 및 재생산(reproduction)을 사용하였다.

하나의 염색체는 각 이미지에 대한 1개의 입자 총 4개의 입자가 임의적으로 선택되어지고 이러한 선택에 대한 3DE 값을 가지게 된다. 이러한 3DE 값을 기준으로 유전 연산자중 격리(isolation)를 적용하게 된다. 격리는 열성인 개체를 집단에서 배제하는 연산자로서 주어진 최대 오차를 넘는 모든 개체를 집단으로부터 배제하게 된다.

격리 연산 후 다시 살아남은 개체들로부터 3차원 속도에 대한 연속성을 적용한 C 적합도를 계산하게 된다. 이러한 C를 기준으로 열성으로 판단된 벡터들에 대해서는 다시 재생산(reproduction)을 하게 된다. 재생산은 각 카메라에 대한 시점을 고정시켜두고 종점에 대한 임의적 선택을 수행한다.

위의 과정이 끝나면 개체간의 교배(crossover) 과정을 거친다. 교배는 카메라에 대한 2차원 벡터를 고정된 상태에서 3DE를 기준으로 하여 객체간의 대응되는 카메라간의 데이터를 바꿈으로서 이루어진다. 교배된 개체의 3DE가 한계값을 넘을 경우 이 입자 또한 배제하게 된다.

위의 과정동안 배제된 데이터들은 다시 초기 개체생성과 같은 과정을 수행하여 선택된 집단으로 되돌려 보내는데 이러한 과정이 이주(migration) 연산이다. Fig. 2.4은 3차원 PTV에 적용되어진 유전알고리즘의 개념도를 나타낸 것으로 그 내용은 앞에서 설명하였다. Fig. 2.5는 유전알고리즘의 순서도를 나타낸 것으로 크게 세대를 발생시킨 후 격리에 의해 그룹을 나누며, 재생산과 교배에 의해서 시간과 공간에 대해서 동시에 3차원 입자쌍을 매칭시킨다. 충분한 수렴조건을 만족시키지 못하면 새로운 세대를 이주시켜서 동일한 과정을 거쳐 수렴할 때까지 반복 연산시킨다.

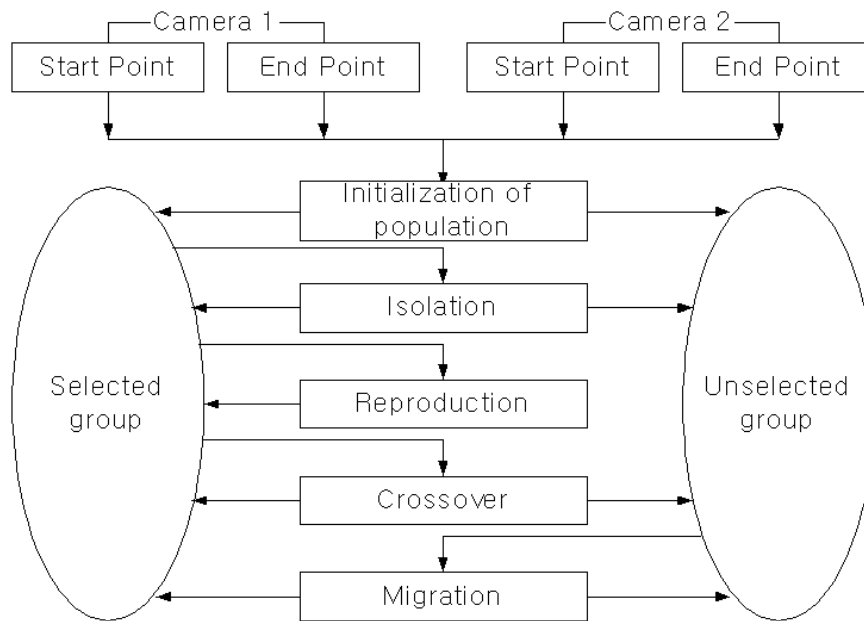


Fig. 2.4 Concept of 3D PTV using GA Algorithm.

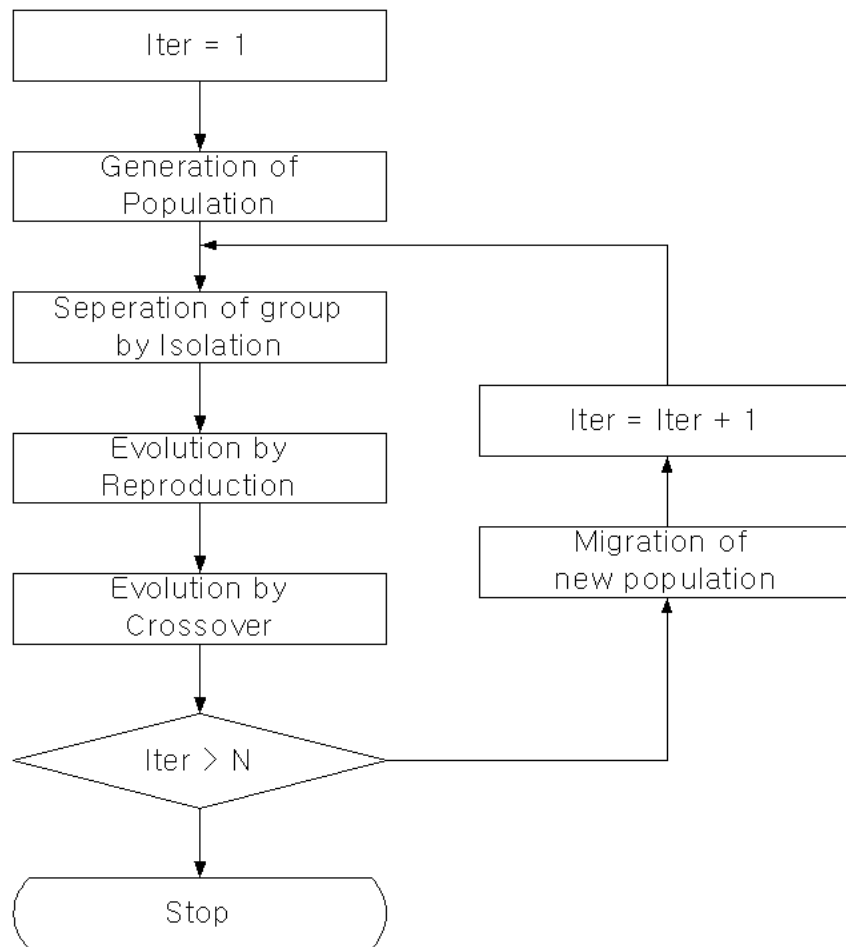


Fig. 2.5 Flowchart of 3D PTV using GA Algorithm.

2.3 스테레오 PIV/PTV

SPIV⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾⁽³¹⁾는 보통 두 대의 카메라를 사용하여 측정한다. 이 시스템에서는 레이저 평면 광으로 조명된 유동 단면에서의 3가지 속도성분을 측정하게 되는데, 일반적으로 out-of-plane의 속도성분은 바로 측정되어지지 않고 두 대의 카메라로 측정한 평면 데이터로부터 도출하게 된다.

3차원계측의 보편적인 방법인 SPIV는 크게 두 가지 방법이 있으며, 이는 카메라의 배치에 따라 구분되어진다.

카메라의 광축이 광원면에 수직하게 설치되어 광원면(object plane)과 렌즈면(lens plane) 및 카메라 센서면(CCD cell)이 평행하게 설치되어지는 시스템으로 Stereoscopic 효과가 카메라의 축으로부터 떨어진 거리에 영향을 받는 Translation법과 2대의 카메라렌즈가 유동가시화 영역과 수직이지 못하고 광원면과 임의의 각도를 이루게 설치하는 Angular displacement법이 있다⁽⁴⁾.

즉 Translation법은 투시 방향에 대한 왜곡이 거의 없기 때문에 기록면의 좌표를 유체내부 입자좌표로 쉽게 변환할 수 있으며 확대율이 영상 기록면의 변위에 무관하므로 3차원 속도 성분을 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있지만 카메라 측정각도가 제한되기 때문에 out-of-plane 속도성분의 오차를 줄이는데 한계가 있으며, 일반적으로 렌즈의 왜곡을 고려하지 않기 때문에 성능이 우수한 렌즈를 사용하여야 한다. 반면에 Angular 법은 측정각도에 거의 제약이 따르지 않으나 취득한 영상에 강한 투시왜곡에 발생하게 되므로 영상 기록면 좌표와 측정단면 좌표 사이의 상관 함수를 구하는 작업이

필요할 뿐만 아니라 유동장의 가시용 벽면에 의한 굴절의 영향으로 카메라 렌즈의 설치를 가능하면 지상면을 기준으로 평행하게 설치해야 하는 단점이 있다. 도 등⁽³²⁾은 Angular법의 장점을 살리고 유동계측의 제약을 주었던 카메라의 배치에 자유성을 부여할 수 있도록 영상의 기하학적 변환(Geometric transformation)을 통하여 굴절과 수차의 영향을 고려함으로써 Translation 법과 Angular법의 단점을 극복한 SPIV법을 제시하였다. 그러나 PIV는 원리상 얻어지는 속도벡터가 격자상에서 얻어지는 결과이므로 격자보다 작은 유동속도성분을 측정하기란 쉽지가 않다.

한편, PTV측정법⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁷⁾은 유동장에 투입된 개별입자들의 중심을 추적한 결과로부터 속도장을 얻어내는 관계로 원리상 유동의 난동성분 혹은 상기의 PIV계산에 필요한 격자보다 작은 크기의 유동속도성분을 측정해 낼 수 있는 장점을 지니고 있다. SPIV의 장점과 PTV의 장점을 살려서 개발된 측정법이 SPTV측정법⁽¹⁰⁾인데 여전히 이 측정법에는 극복해야 할 사안들이 있다.

또한 Angular displacement법의 경우 측정각도의 영향은 거의 받지 않으나 획득된 영상에 강한 왜곡이 발생하므로 이에 따른 보정과정이 필요하며, 이를 극복하기 위해 Prasad 등⁽²⁹⁾은 Scheimpflug stereo camera를 제안하였다. Prasad 등은 Angular displacement 법의 경우 Fig. 2.6같이 카메라의 초점영역과 대상사이에 편차에 의한 이미지의 초점이 흐트러지는 효과가 생김을 확인하였으며, 이 효과를 제거하지 위하여 카메라의 초점영역의 조정을 위해 Fig. 2.7과 같은 방법을 사용하였다. 즉 카메라의 센서면과 렌즈사이의 각을 임의로 조정할 수 있게 고안하였다. 본 연구에서는 Translation법과

Angular법의 단점을 극복한 Hybrid SPIV/SPTV법과 Scheimpflug법을 동시에 사용하여 카메라를 배치하였다.

2개 이상의 CCD 카메라를 사용하여 Stereoscopic matching기법으로 3차원 속도장을 추출해 내는 3D PIV 방식이 주류를 이루고 있으나, 현재 3D PTV방식도 사용되어지고 있다. 이들 기법의 차이는 Fig. 2.8과 Fig. 2.9에 그림으로 표현하였다. SPIV의 경우는 Fig. 2.8과 Fig. 2.10에서처럼 격자상의 임의의 한점을 시점으로 고정시킨 후 2D PIV기법을 사용하여 다음 시각에서 종점을 구하게 되며, 2 대의 카메라에서의 2차원 시점과 종점을 이용하여 3차원 속도성분을 구하는 방식이다. 즉 2차원 속도 벡터는 계조치 상호상관법에 의해 계산되어지며, 두 프레임간의 추적입자들의 농도분포에 대한 상관계수의 값이 최대치일 때의 점이 이동벡터의 종점이 된다. 3차원 속도 벡터를 구하기 위해서는 먼저, 구해진 2차원 속도 벡터의 시점과 종점을 각각의 카메라에서 공선의 조건(직선방정식)을 이용하여 최종적으로 3차원 속도 벡터를 구한다.

또한 SPTV의 경우는 3D PTV와 동일한 원리가 적용되어 진다. 다만 SPIV/SPTV의 경우는 2차원 단면상에서 3차원 속도를 구하는 것이므로 면 형태의 광원을 사용하며, 3D PTV의 경우는 볼륨형태의 광원을 사용하여 3차원 공간에 대한 3차원 속도성분을 구하는 것이 다르다. 특히 SPTV 경우는 7mm 정도 내외의 광원 내에서의 입자들의 3차원 속도성분을 측정할 수 있는 장점이 있다.

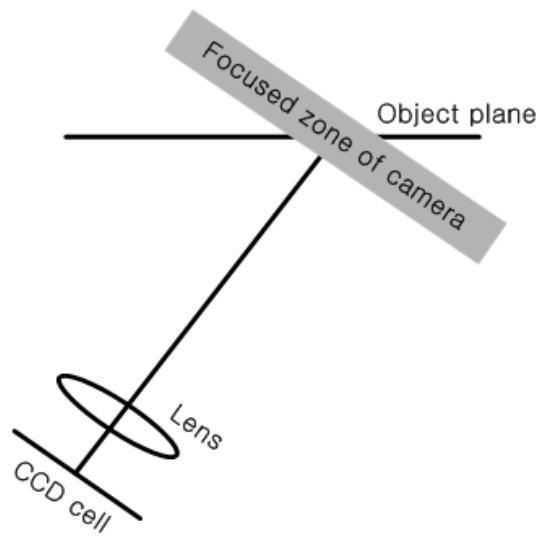


Fig. 2.6 Angular displacement's lens array.

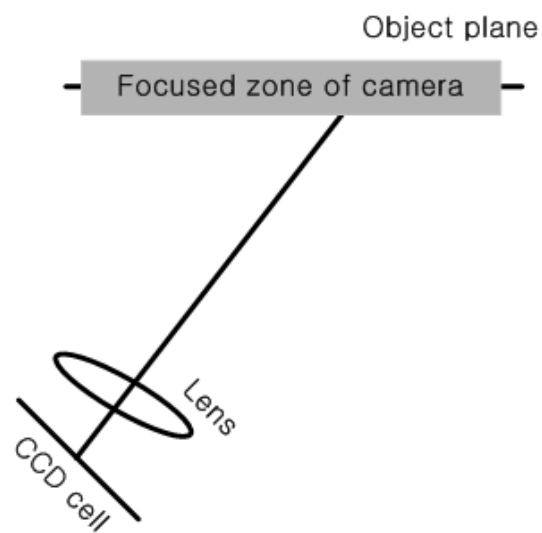


Fig. 2.7 Scheimpflug's lens array.

Stereoscopic PIV

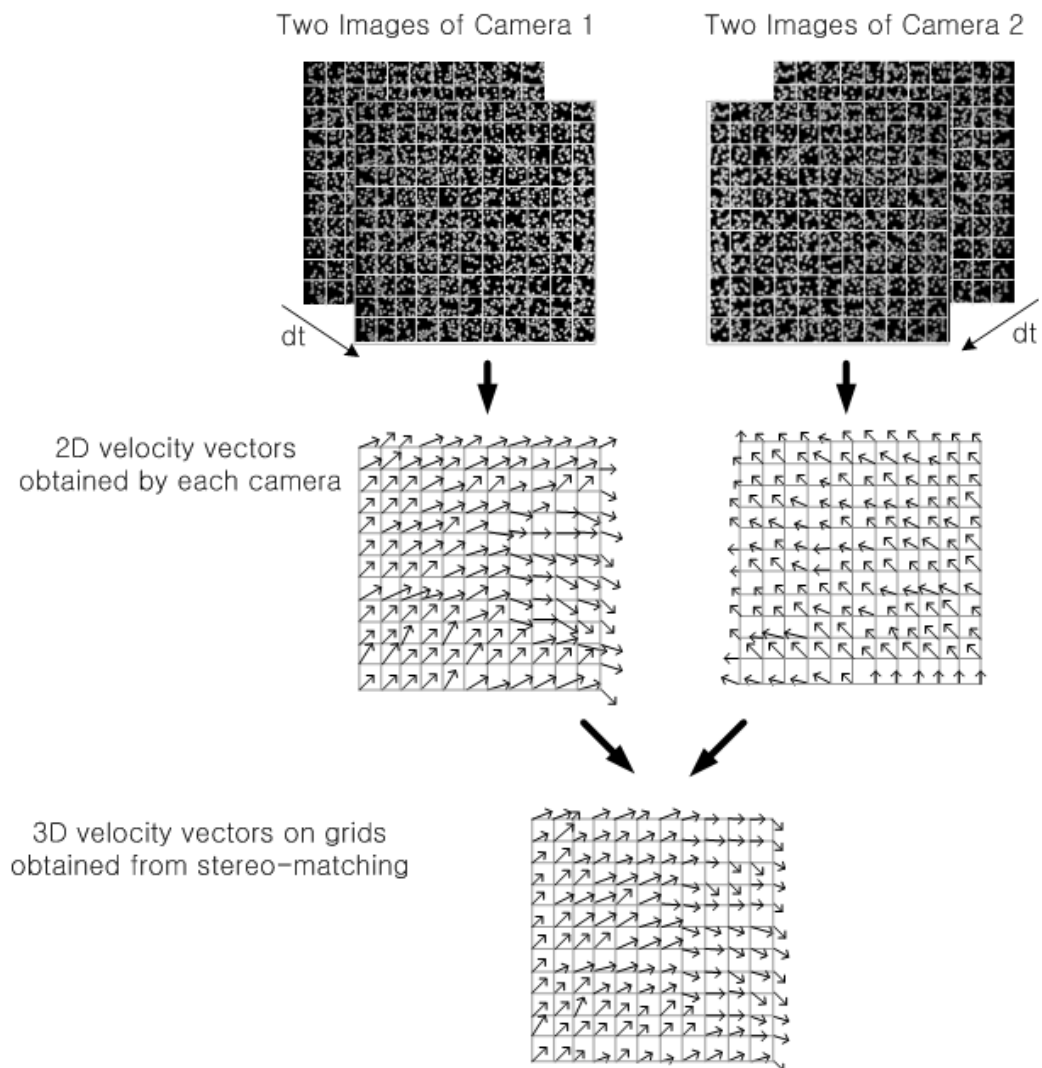


Fig. 2.8 Schema of SPIV.

Stereoscopic PTV

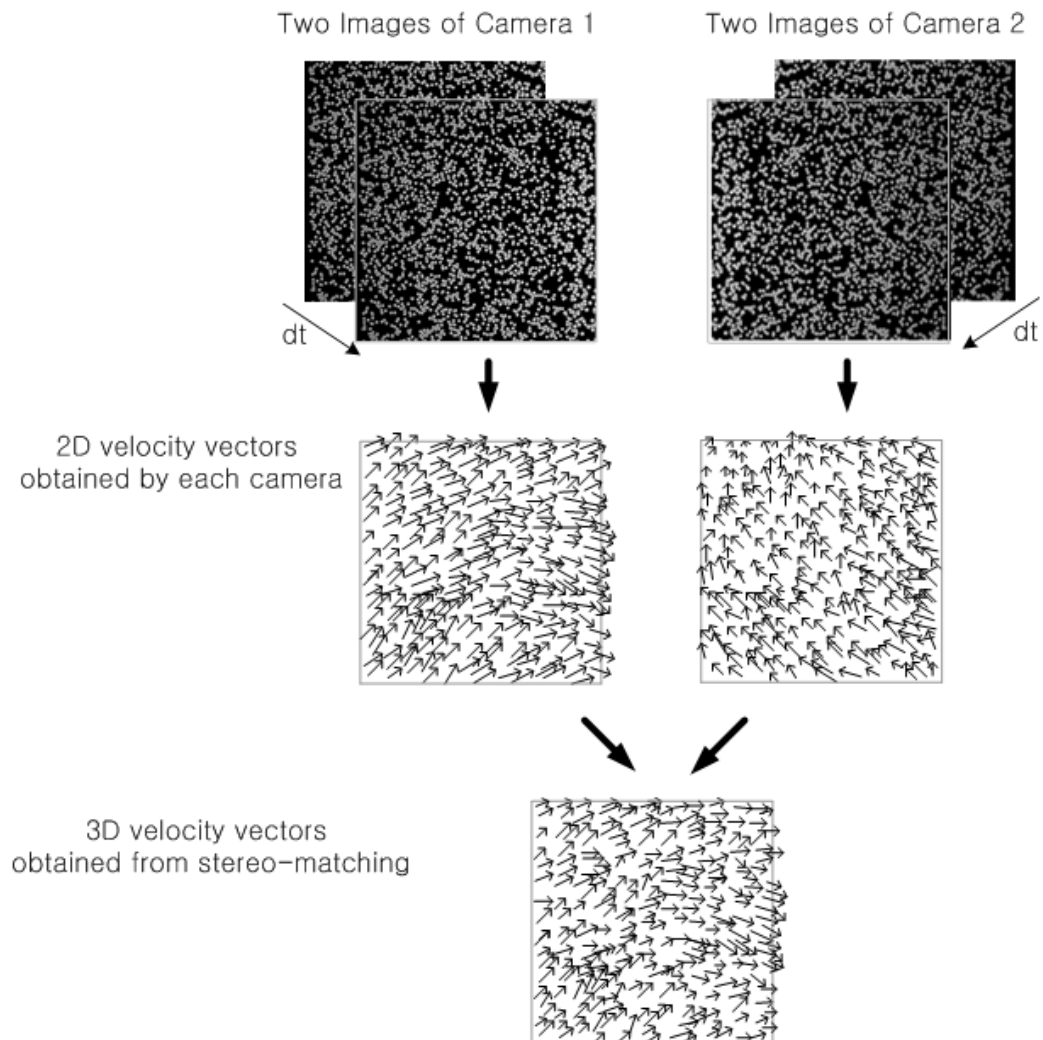


Fig. 2.9 Schema of SPTV.

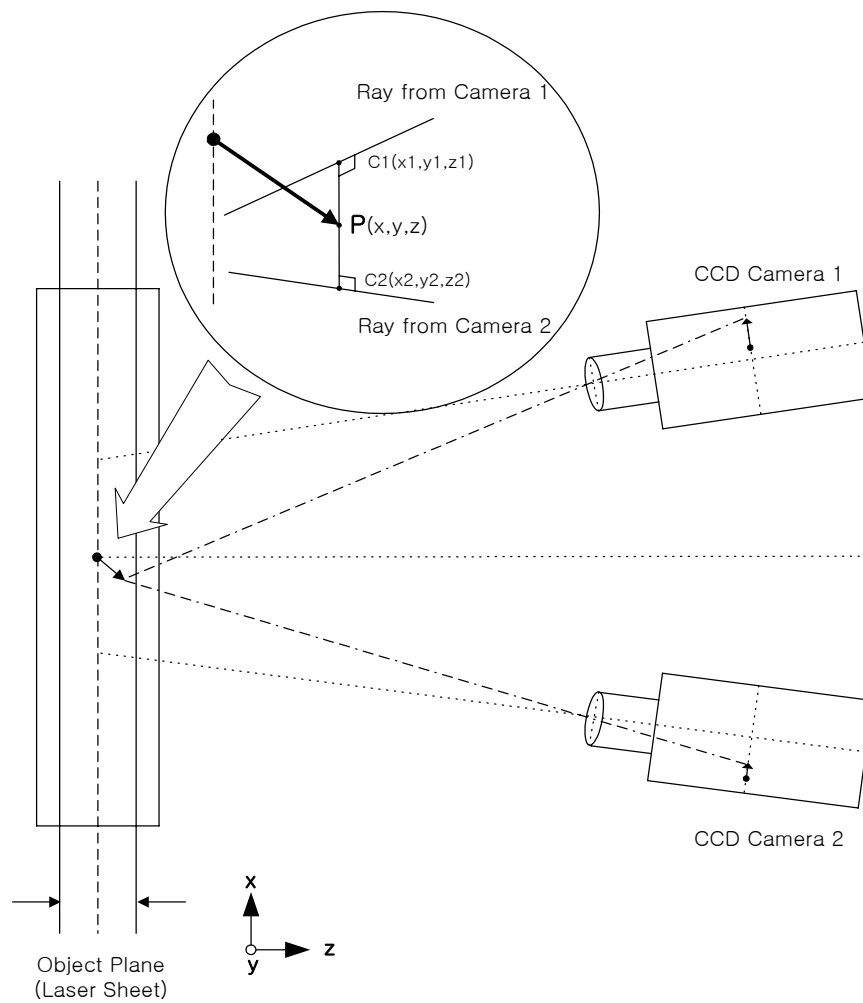


Fig. 2.10 Definition of 3-D particle position.

제 3 장 고해상 4D PTV의 구축

3.1 연구배경

3D PTV는 HPIV보다는 공간해상도가 떨어지나 유동장 공간에 걸친 많은 순시속도벡터를 얻어내므로 난류통계량의 공간분포 및 공학적 응용에 쉽게 적용될 수 있는 순간의 거시적 물리량(속도프로파일 등)들에 대하여 공학적으로 타당한 결과를 제공하였다⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾⁽³³⁾. HPIV가 유동장의 해석에 가장 이상적인 방법이나 Hologram 필름의 소재와 사용되는 레이저의 성능한계 및 측정원리상 데이터처리의 난점과 같은 문제점을 극복하기 위하여 최근에는 고해상 디지털카메라를 이용한 HPIV가 등장되고 있다⁽³⁴⁾. 즉, 오늘날의 HPIV에서는 고해상 디지털카메라를 도입함으로써 그 성능을 향상시켜 가고 있다.

한편, 3D PTV에서는 측정알고리즘이 이상적이라 할 때, 카메라의 해상도가 향상된다면 얻어지는 순간 속도 벡터수는 해상도의 멱승으로 증가하는 관계에 있으므로⁽³⁵⁾, 고해상 카메라를 사용하여 HPIV의 성능을 향상함은 3D PTV의 성능향상과 연관하다고 볼 수 있다. 그러므로 현재 직면한 HPIV의 난점을 극복한 시간 및 공간해상도를 향상시킨 4D PTV를 구축하였다.

3D PTV가 시간해상도를 향상시킨 4D PTV 시스템으로 확장되기 위해서는 유동장의 라그랑지 주파수(lagrange frequency)⁽³⁶⁾보다 빠른 속도로 고

해상의 3차원 측정이 이루어져야 한다. 이에 2000Hz의 고해상 카메라(1k x 1k)로 구성된 4D PTV시스템으로 구축하였으며, 이로부터 충돌분류의 시간 연속적 유동구조변화 및 물리량 변화를 얻고자 하였다.

또한 열·유체-구조물간의 연동운동해석을 위해 기존의 수치해석적인 방법을 탈피하기 위하여 4D PTV를 기반으로 열·유체-구조물 연동운동 해석 알고리즘을 개발하여 FSIMS을 구축하였다.

3.2 고해상 카메라의 필요성

Fig. 3.1은 LES와 DNS에 대한 설명을 그림으로 간략히 나타낸 것이다. LES의 경우 미소 스케일링만 모델링을 사용하며, 그 외에는 수치계산으로 직접 계산한다. 반면에 DNS의 경우는 난류의 미세 스케일 전체에 대해서 수치계산을 수행하므로 정확하지만 계산부하가 과대하게 걸린다. 동일한 계측영역에 대해서 일반적으로 512×512Pixel의 저해상도를 갖는 카메라보다 1024×1024Pixel의 고해상도를 갖는 카메라의 공간해상도가 4배 높다. CFD에서 높은 공간해상도는 동일 영역에 대한 격자수의 증가와 격자간격의 조밀해짐을 의미한다. 즉 동일 영역에 대해 4배나 많은 격자를 생성시키게 되므로 작아진 격자사이즈 만큼의 미세와(渦)를 계산할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 PTV실험계측을 통한 난류의 미세구조측정 가능성을 제시하는 것이므로 추후 지속적으로 개발되는 초고해상 카메라도입에 따른 측정에 의한 DNS수준의 해석가능성에 대한 검증차원에서도 의의가 있다고 하겠다. 한편, 카메라의 해상도가 향상되는 만큼 획득되어지는 순간속도 벡터수는

해상도의 먹승으로 증가함을 Doh 등⁽³⁵⁾의 결과에서도 확인된 바 있다.

따라서, 고해상도의 카메라를 사용하는 것은 이에 상응하는 공간해상도를 높일 수 있게 되며, 이에 상응하는 3차원 순시속도벡터가 증가함으로 더욱 정밀한 유동현상을 해석할 수 있는 데에 장점이 있다.

한편, Fig. 3.2는 4D PTV의 특징을 그림으로 간략히 나타낸 것으로, 일반적으로 열선유속계 혹은 레이저도플러유속계의 경우 1점에 대해서 물리량을 얻을 수 있으나, 반면에 고해상도 4D PTV의 경우 측정영역 전 공간에 대한 정보를 갖고 있으므로, 이 영역을 격자로 나누는 수 만큼의 가상의 센서가 존재하게 된다. 따라서, 이러한 가상의 센서를 통해서 원하는 공간에서의 물리량을 1번의 실험을 통해서 얻을 수 있는 장점이 있다.

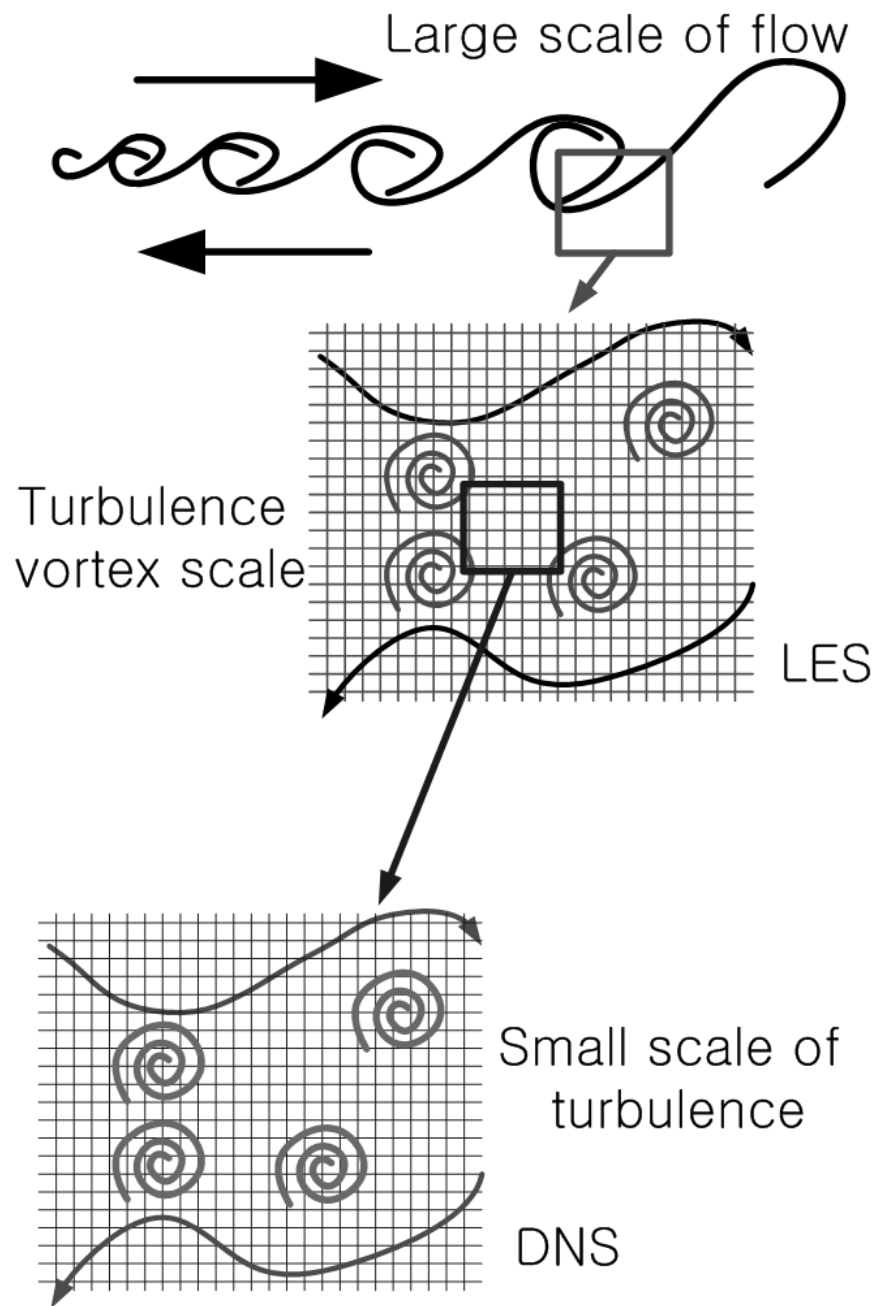


Fig. 3.1 Schema of LES and DNS.

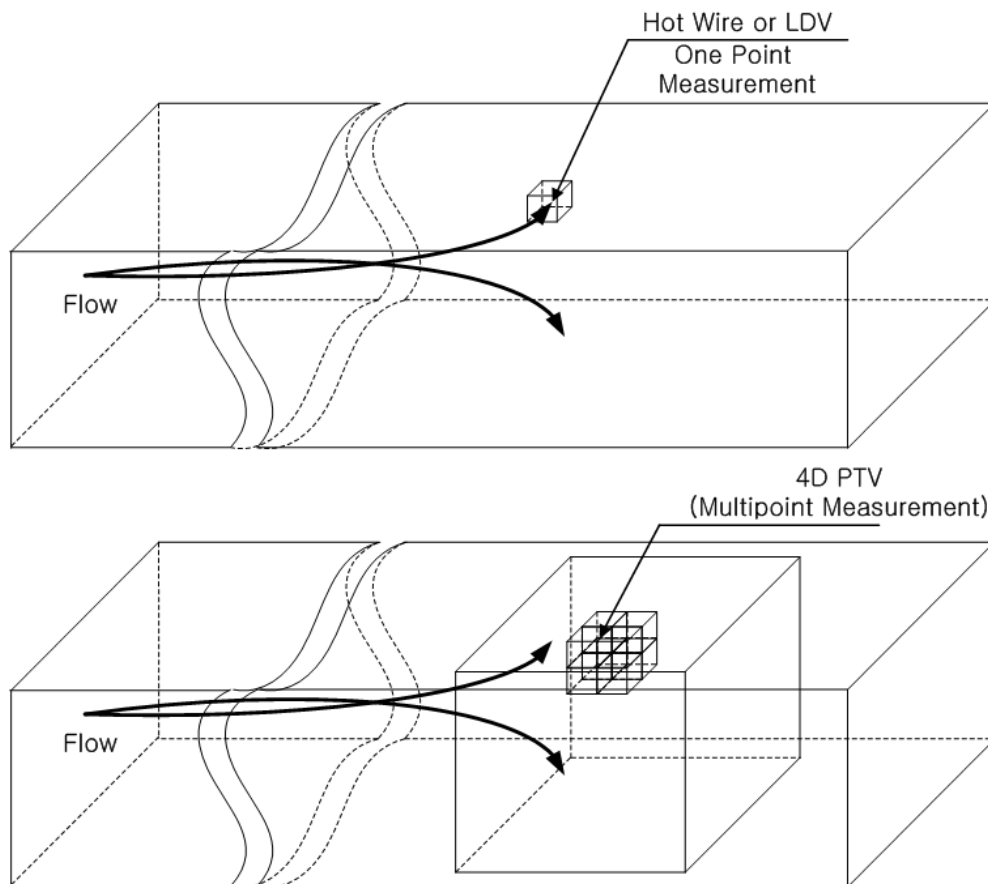


Fig. 3.2 Eulerian concept for 4D PTV.

3.3 4D PTV의 필요성

Fig. 3.3은 일반적인 3D PTV와 4D PTV의 차이를 그림으로 간략히 표현한 것이다. 실제 자연현상이나 유동장은 비정상(unsteady)적이므로, 그림에서와 같이 기존의 3D PTV의 경우는 시간에 불연속적인 결과를 얻게 되어, 관측 및 측정의 공백기가 존재하게 된다. 반면에 4D PTV의 경우 기존의 3D PTV보다 높은 시간해상도를 지니므로, 시간의 불연속에 의한 관측 및 측정의 공백기를 줄일 수 있는 장점이 있다. 현재 고해상도 고속카메라의 경우 1024×1024 pixel의 영상을 1초에 3000장 이상 찍는 고속도 카메라가 생산되어지고 있는 실정이다. 따라서 4D PTV의 경우 시간에 연속적인 자연현상과 유동장의 해석이 가능해진다. 기존의 3D PTV의 경우 그 순간의 순시변화를 관찰할 수 있으며, 1000장 이상의 순시치를 앙상블 평균(ensemble average)함으로써 평균 유동장 해석에 유용하게 사용할 수 있다. 즉 실험의 목적에 따라서 3D PTV 혹은 4D PTV를 선택적으로 사용할 수도 있다.

난류운동(turbulent motions)에 있어서 거대 스케일(large-scale) 난류운동은 대략적으로 점성에 독립적이고, 미소 스케일(small-scale) 운동은 점성에 의해서 제어되어진다. 또한 미소 스케일(small-scale) 운동들은 통계적으로 거대 스케일(large-scale) 난류 요동(fluctuations)과/또는 평균 운동(mean motions)에 독립적이다.

Kolmogorov의 일반적인 형평 이론(universal equilibrium theory)은 다음과 같다. 미소 스케일 난류는 거대 스케일에 관계없이 평형하고 오로지 소

산율(ϵ)과 점성(ν)에 제어되어진다.

또한 Kolmogorov scale은 다음과 같은 식(3.1), (3.2), (3.3)으로 정리되어진다.

앞서 3D PTV가 시간해상도를 향상시킨 4D PTV 시스템으로 확장되기 위해서는 유동장의 라그랑지 주파수(Lagrange frequency)⁽³⁶⁾보다 빠른 속도로 고해상의 3차원 측정이 이루어져야 한다고 전술하였다. 이는 무조건 빠른 고속도카메라만 있으면 된다는 의미이기도 하나, 실험목적외의 필요이상의 고속도카메라는 불필요하다는 뜻을 포함한다. 즉, 4D PTV를 위한 시간 해상도 조건이 존재한다는 의미이며, 구속 난류 이론(frozen turbulence hypothesis) 전제에서 이 조건은 식 (3.4)로 정의된다.

이 식 (3.4)는 시간간격 Δt 가 구속난류이론의 가정하에서 대류 시간 스케일 보다 길게 기대되는 난류 시간 스케일 보다 짧아야 한다는 것을 암시한다.

$$\text{Length Scale} \quad \eta \equiv \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.1)$$

$$\text{Time Scale} \quad \tau \equiv \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

$$\text{Velocity Scale} \quad \tau \equiv (\nu\epsilon)^{\frac{1}{4}} \quad (3.3)$$

$$\Delta t \ll \frac{D}{U_0} < \tau \quad (3.4)$$

Δt : Image sampling time

$\frac{D}{U_0}$: Convection time scale

τ : Turbulence time scale (Kolmogorov time scale)

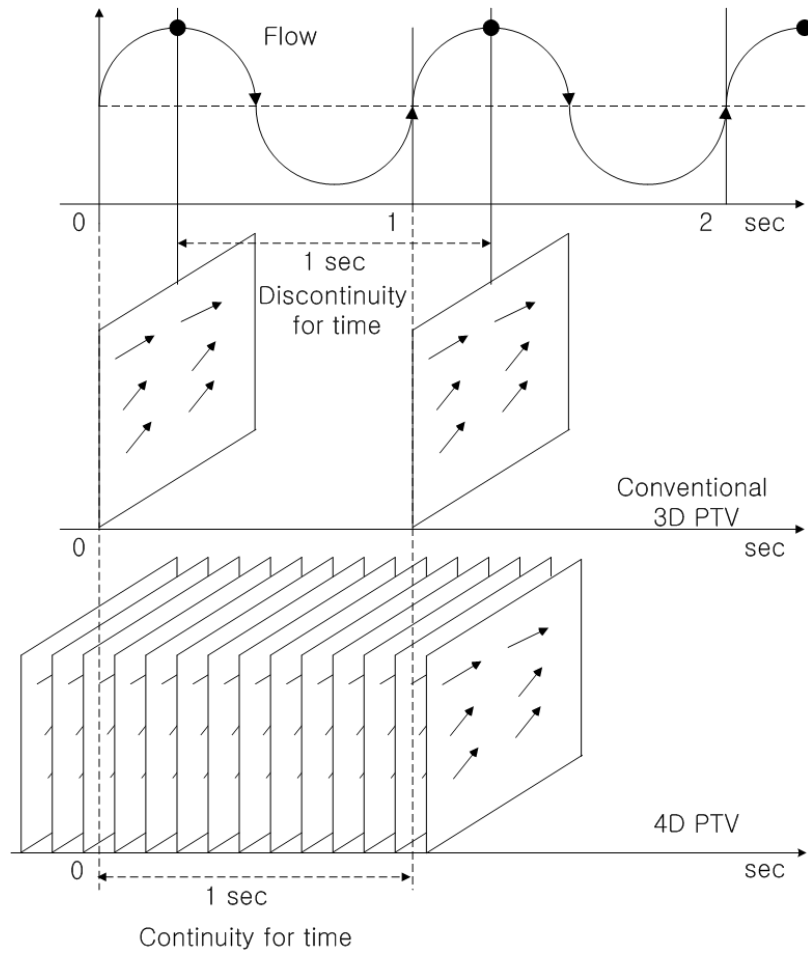


Fig. 3.3 Comparison of the conventional 3D PTV vs. 4D PTV.

3.4 3D PTV와 SPIV/SPTV에서의 계측오차의 불확실성

본 절에서는 3D PTV와 SPIV/SPTV에서의 카메라 교정에 따른 오차를 평가하고자 한다. PIV와 PTV의 경우 실험장비에 있어서 대동소이하므로, 장비에 대한 평가는 거의 차이가 없다고 해도 무방하다. 다만 3D PTV와 SPIV/SPTV는 기존의 PIV와는 달리 3차원 속도벡터를 구하게 되므로 2.1절에서 구술되어진 카메라의 표정요소(標定要素)가 필요하며, 이를 구하기 위해서는 절대좌표를 알고 있는 교정기가 필요하다. 교정기의 좌표값을 이용하여 구하게 된 카메라의 표정요소를 이용하여, 교정기의 사진좌표계에 대해서 원래의 3차원 값으로 복원시켰을 때의 오차를 카메라의 교정오차라고 정의한다. 또한 이 카메라의 교정오차가 바로 3D PTV 및 SPIV/SPTV에서의 계측오차의 불확실성과 직접적인 연관이 있다. 즉 이들 기법들은 비측정용 카메라를 이용하여 3차원 공간 혹은 단면상의 수직인 속도를 검출하기 위해서는 카메라에게 공간을 인식시키는 과정이 필요하며 이 과정이 바로 교정기를 이용한 교정작업이다. 따라서 교정작업 정확하지 못하다면 카메라 자체의 교정오차의 증가에 따른 불확실성의 증가를 초래하게 된다.

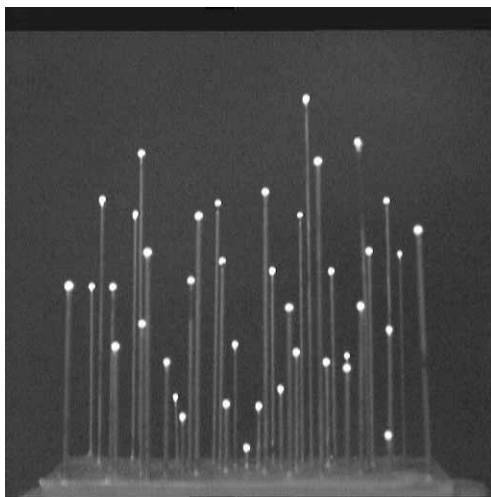
카메라의 교정을 위해서 사용되는 교정기의 제약은 없으나, 3D PTV의 경우 교정작업의 편의성을 위해 편 형태의 공간 교정기를 사용하며, SPTV/SPTV의 경우는 공간의 제약이 있으므로 평판형태의 교정기를 z축으로 일정 간격씩 이동하여 교정작업을 수행한다.

3.4.1 3D PTV에서의 교정

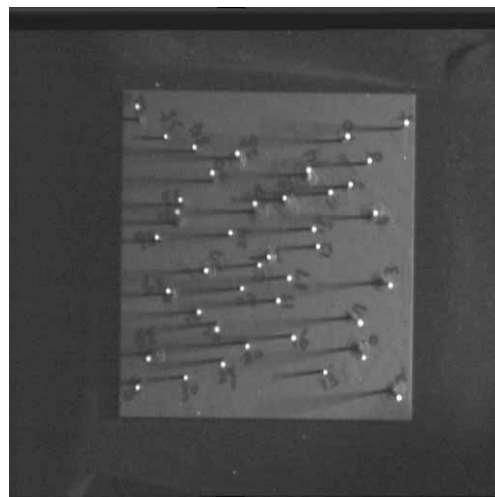
3D PTV에서 카메라의 표정요소를 구하기 위해서 Fig. 3.4와 같은 핀 형태의 교정기를 주로 사용한다. 이 과정은 카메라로 하여금 3차원 공간을 인식시키는 중요한 작업이 된다. 따라서 공간내의 표준이 교정기의 크기는 계측영역에 따라 선택적으로 제작할 수 있으며, 통상적으로 110mm×100mm판 위에 직경이 1mm인 핀의 끝단에 지름이 0.6mm인 구가 달린 핀을 판위에 임의의 위치에 임의의 높이로 설치를 한다. 이 때 핀들이 서로 가려지지 않도록 배치를 하여야 한다. 또한 핀은 대략 38~42개 내외로 사용하며, 이렇게 제작된 교정기는 각 핀의 끝단의 구에 흰색 도료를 칠하여 카메라에서의 식별이 용이하게 한다. 또한 교정기의 3차원 위치는 공인된 검정기관을 통하여 0.001 mm 오차이내까지 계측하여 얻어낸 결과를 이용하였다.

일반적으로 실험은 주로 물속에서 이루어지나 공기 중에서도 실험이 수행되므로 물 속과 공기 중에서의 교정기 오차를 살펴보았다. 카메라는 교정기 측면에 대해 서로 90°의 각을 이루도록 배치하였다. Fig. 3.5와 Fig. 3.6은 각각 공기 중과 물 속에서의 교정기를 나타낸 것으로, 물속에서의 경우 공기 중과 달리 기포들과 굴절률에 영향을 받는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 영향을 최소로 하기위해서 교정기면과 카메라의 면이 최대한 수직이 되게 하여 굴절율의 영향을 줄여야 한다. Table 3.1과 Table 3.2는 교정기를 통해 구해진 카메라의 표정요소를 이용하여 원래의 교정기의 사진좌표계를 통하여 복원된 3차원 좌표값과 교정기 좌표값의 상대오차를 나타낸 것으로, 전체 40개의 핀 중에서 공기에서는 35개가 매칭되었으며, 물에서는 28개가

매칭되었고, 상대오차는 물속에서의 오차가 공기 중에서보다 다소 높은 것으로 확인되었다. 이는 상기 기술된 바와 같이 물에서의 굴절율과 물속의 기포 등에 의한 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 또한 교정기가 핀 형태로 반복되는 실험에 의해서 교정기 자체의 정밀도 및 정확도가 떨어질 수 있으므로, 주기적인 교정기의 계측이 필요하다.



(a) Side view

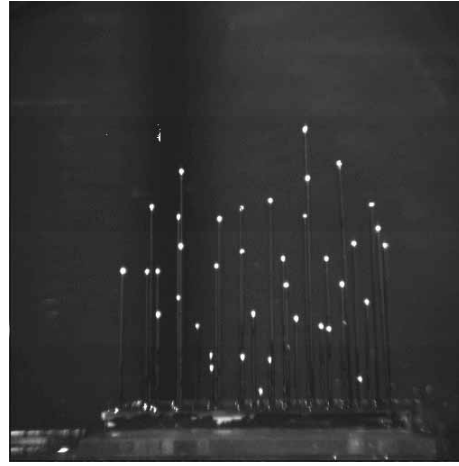


(b) Top view

Fig. 3.4 Pin typed calibrator.

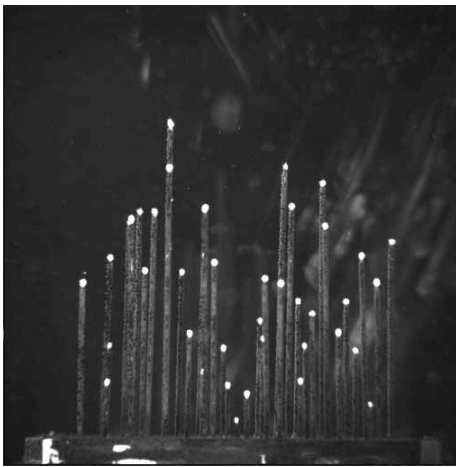


(a) Camera 1's image



(b) Camera 2's image

Fig. 3.5 Pin typed calibrator in air.



(a) Camera 1's image



(b) Camera 2's image

Fig. 3.6 Pin typed calibrator in water.

Table 3.1 Relative errors for camera parameter in air.

No	Cal. x	ABS x	Cal. y	ABS y	Cal. z	ABS z	dx	dy	dz
2	-43.00	-43.20	-43.07	-42.51	46.17	46.16	0.20	0.56	0.01
3	-7.44	-7.73	-37.59	-37.23	68.57	68.47	0.29	0.36	0.10
4	15.00	14.95	-33.49	-33.06	46.51	46.48	0.05	0.43	0.03
5	43.78	43.95	-42.28	-41.94	46.86	47.03	0.17	0.34	0.17
6	-30.01	-29.81	-30.41	-30.38	65.13	65.38	0.21	0.03	0.25
7	-18.74	-18.85	-28.20	-28.26	80.91	80.98	0.10	0.06	0.07
8	32.16	32.20	-31.73	-31.43	31.87	32.14	0.04	0.30	0.28
9	24.01	24.01	-25.49	-24.90	37.50	37.40	0.00	0.59	0.10
10	38.45	38.13	-23.20	-22.76	55.02	54.95	0.32	0.44	0.07
11	21.55	21.16	-19.35	-18.92	27.75	27.87	0.39	0.43	0.13
12	4.00	4.27	-16.17	-16.46	13.12	13.69	0.27	0.28	0.58
13	-37.52	-37.58	-20.08	-19.44	16.56	16.87	0.06	0.63	0.31
14	26.96	27.15	-10.93	-11.04	64.07	64.08	0.20	0.11	0.01
15	9.06	9.02	-13.68	-13.84	48.18	48.13	0.04	0.15	0.05
16	-24.82	-24.67	-7.84	-7.99	67.97	68.01	0.15	0.15	0.04
17	-6.56	-6.51	-6.34	-6.58	53.09	53.03	0.05	0.24	0.05
18	19.45	19.43	-4.25	-4.05	17.18	17.57	0.02	0.20	0.39
19	-14.09	-13.90	-3.17	-3.34	31.29	31.59	0.19	0.17	0.30
20	-28.53	-28.00	6.31	5.99	50.47	50.56	0.52	0.32	0.10
21	-2.89	-3.06	3.32	3.89	15.69	16.01	0.17	0.57	0.32
22	16.00	15.90	5.44	5.42	70.26	70.11	0.10	0.02	0.15
24	7.02	7.24	13.34	12.90	29.93	30.15	0.22	0.44	0.23
25	32.40	31.93	11.85	11.89	41.56	41.47	0.46	0.04	0.09
26	24.70	24.53	18.94	18.66	77.74	77.65	0.17	0.28	0.09
27	-5.38	-5.27	21.12	20.51	27.02	27.36	0.11	0.61	0.33
28	-21.59	-21.89	14.94	15.02	95.46	95.38	0.29	0.07	0.09
30	-40.70	-40.20	26.95	25.89	27.61	27.95	0.50	1.06	0.34
31	-18.42	-18.09	22.24	22.03	50.32	50.42	0.33	0.21	0.10
33	16.78	16.82	29.91	29.62	41.61	41.87	0.04	0.29	0.25
34	34.61	34.57	26.46	25.68	26.64	26.94	0.04	0.78	0.30
36	4.64	4.90	37.50	36.83	35.41	35.74	0.26	0.67	0.33
37	-12.18	-11.90	32.23	32.04	55.52	55.57	0.28	0.19	0.05
38	-32.61	-32.59	37.28	36.30	69.06	68.94	0.02	0.99	0.12
39	-41.78	-42.73	41.43	40.42	54.79	54.83	0.95	1.01	0.04
40	44.86	45.24	43.86	42.76	60.36	60.33	0.37	1.10	0.03

Averaged error : 0.22 0.40 0.17 Standard deviation : 0.29 0.51 0.22

Table 3.2 Relative errors for camera parameter in water.

No	Cal. x	ABS x	Cal. y	ABS y	Cal. z	ABS z	dx	dy	dz
2	-43.03	-43.20	-43.73	-42.51	45.99	46.16	0.17	1.22	0.17
3	-7.33	-7.73	-38.08	-37.23	68.52	68.47	0.40	0.85	0.05
4	14.94	14.95	-33.97	-33.06	46.41	46.48	0.01	0.91	0.08
5	43.82	43.95	-42.96	-41.94	46.71	47.03	0.12	1.03	0.31
6	-30.05	-29.81	-30.88	-30.38	65.22	65.38	0.24	0.51	0.16
7	-18.75	-18.85	-28.54	-28.26	80.97	80.98	0.09	0.29	0.02
8	32.21	32.20	-32.22	-31.43	31.63	32.14	0.01	0.78	0.52
9	24.06	24.01	-26.04	-24.90	37.36	37.40	0.04	1.14	0.04
10	38.45	38.13	-23.55	-22.76	54.92	54.95	0.32	0.79	0.03
14	26.94	27.15	-11.16	-11.04	64.02	64.08	0.21	0.12	0.06
15	9.10	9.02	-14.07	-13.84	48.13	48.13	0.08	0.23	0.00
16	-24.63	-24.67	-7.80	-7.99	68.12	68.01	0.04	0.20	0.11
17	-6.52	-6.51	-6.40	-6.58	53.03	53.03	0.00	0.18	0.01
19	-14.07	-13.90	-3.23	-3.34	31.12	31.59	0.17	0.11	0.46
20	-28.51	-28.00	6.34	5.99	50.43	50.56	0.50	0.35	0.13
22	15.93	15.90	5.41	5.42	70.21	70.11	0.03	0.01	0.11
24	6.96	7.24	13.27	12.90	29.76	30.15	0.28	0.37	0.40
25	32.33	31.93	11.83	11.89	41.48	41.47	0.40	0.06	0.01
26	24.61	24.53	18.98	18.66	77.75	77.65	0.08	0.32	0.10
27	-5.37	-5.27	21.15	20.51	26.85	27.36	0.10	0.64	0.50
28	-21.74	-21.89	15.08	15.02	95.73	95.38	0.15	0.06	0.36
31	-18.37	-18.09	22.40	22.03	50.29	50.42	0.27	0.38	0.14
33	16.76	16.82	30.00	29.62	41.60	41.87	0.06	0.38	0.27
34	34.57	34.57	26.52	25.68	26.49	26.94	0.00	0.83	0.45
36	4.67	4.90	37.77	36.83	35.42	35.74	0.24	0.95	0.32
38	-32.65	-32.59	37.62	36.30	69.12	68.94	0.06	1.32	0.18
39	-41.88	-42.73	41.71	40.42	54.83	54.83	0.86	1.29	0.00
40	44.82	45.24	44.13	42.76	60.44	60.33	0.42	1.37	0.11

Averaged error : 0.19 0.60 0.18 Standard deviation : 0.27 0.75 0.25

3.4.2 SPIV/SPTV에서의 교정

SPIV/SPTV의 경우 3D PTV와는 달리 계측영역의 제약에 따라 핀 형태의 교정기를 사용할 수 없으므로, 평판형태의 교정기를 만들어서 z 축방향으로 일정간격으로 이동시켜 사용한다. 3D PTV의 경우 교정작업이 공간 교정기에 의한 간단하게 이루어지나, 스테레오의 경우는 해당 단면에 대한 카메라의 표정요소를 각각 구한 후, 최종적으로 일정간격으로 움직여진 공간에 대한 카메라 표정요소를 구하게 된다. Fig. 3.7은 x 와 y 크기를 갖는 평판에 대해서 dz 만큼 z 방향으로 이동하는 교정기의 모습을 나타낸 것으로, 단면에 대한 정보를 이용하여 공간을 인식시키는 작업이다.

Table 3.3 과 Fig. 3.8은 교정기에 따른 카메라의 교정 오차를 살펴보기 위하여 사용된 평판 교정기의 사양과 사진을 나타낸 것으로, 각각의 교정기에 대해 z 축 방향으로 3mm씩 총 15회 이동시켜 교정작업을 수행하였으며, 교정작업의 변수로써 두 카메라사이의 각을 30도와 40도로, 교정영역의 매질을 물, 공기로 하였으며, 여기에 Fig. 3.9처럼 거울을 사용하여 각각의 매질 속에서의 거울 반사의 영향도 함께 고려하였다.

Fig. 3.10부터 Fig. 3.13까지는 상기 제시된 교정기중 1번에 해당하는 것으로 두 카메라 각이 30도일 때, 매질별, 거울반사 유무에 따른 $z=0$ 축에서의 카메라 1과 2에서의 영상을 나타낸 것이다. 공기 중에서의 교정기의 영상이 가장 좋으며, 물속에서 거울의 반사를 통한 교정기의 영상이 가장 좋지 않음을 확인할 수 있으며, 이는 Table 3.4을 통해서 확인할 수 있다. 이 결과 두 카메라 사이각의 변화에 대해서는 30도와 40도의 두 각도로는 각에 대한

특징을 확연하게 구분하기 어려웠으나, 동일한 조건에 대해서는 교정기 2(x,y ; 간격 4mm)일 때 가장 오차가 적었으며, 동일매질에 대해서는 거울에 반사되지 않는 경우가 오차가 적었다. 또한 절대적이지는 않으나. 매질이 물보다는 공기일 때 보정오차가 다소 작음을 확인할 수 있었으며, x, y 평면좌표의 오차보다 z축 오차가 상대적으로 약 2배정도 크게 됨을 확인할 수 있는데, 이는 Stereo 방식의 카메라 배치에 따른 두 카메라 사이의 각도에 기인한다. 즉, 광원면에 수직으로 나오는 w속도성분은 특징을 이루고 있는 카메라의 센서면에 투영되어서 2차원 사진 좌표계로 나타나게 되는데, 이때 투영에 따른 오차가 발생하기 때문에 Z축의 오차가 x,y 좌표보다 오차가 크게 된다.

따라서 SPIV/SPTV를 위한 최적의 교정기의 간격이 존재함을 확인하였으며, 본 실험에서는 4mm의 교정기가 최적임을 확인하였다. 또한 실험의 필요성에 따라서 매질을 물이나 공기 또는 거울의 반사를 이용할 수 있게 되는데 이들 결과 역시 공학적으로 허용할 수 있는 오차 범위에 있으므로 이들을 사용하는데 큰 문제가 없다고 사료된다.

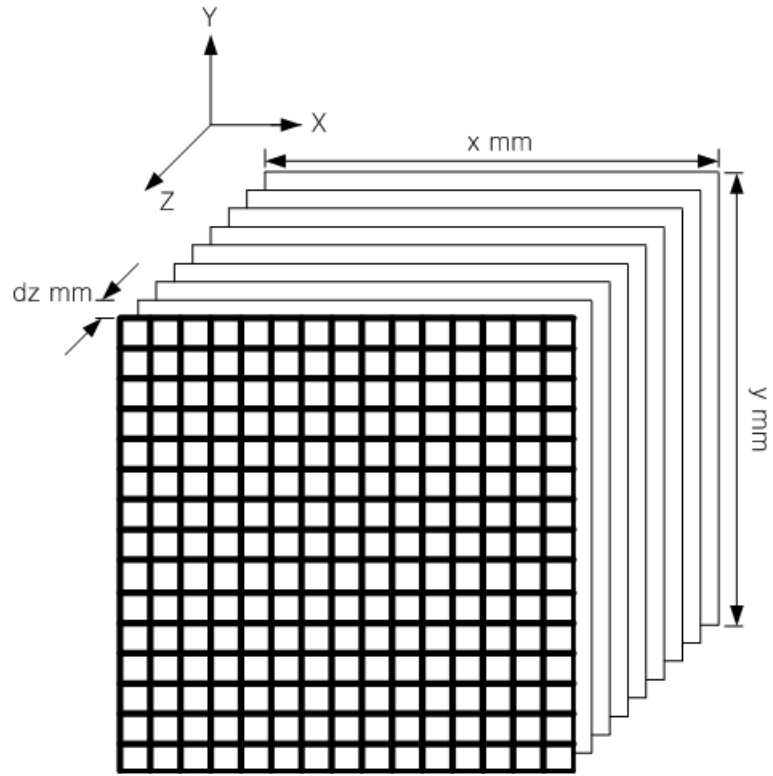
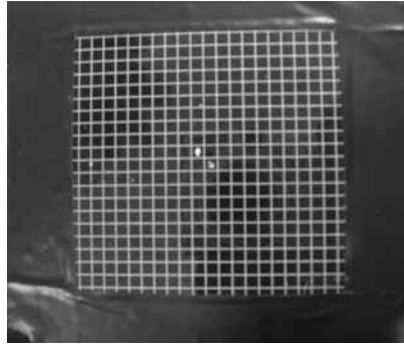


Fig. 3.7 Image for camera calibration.

Table 3.3 Plane calibrator's information for SPIV/SPTV.

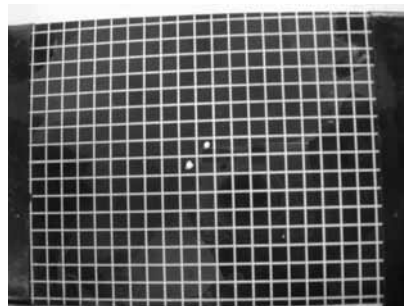
Calibrator No.	x	y	z	x,y grid Interval	z Interval / Count
1	-30mm~ 30mm	-30mm~ 30mm	-21mm~ 21mm	3mm	3mm / 15
2	-24mm~ 24mm	-28mm~ 28mm	-21mm~ 21mm	4mm	3mm / 15
3	-50mm~ 50mm	-40mm~ 40mm	-21mm~ 21mm	5mm	3mm / 15



(a) Calibrator number 1



(b) Calibrator number 2



(c) Calibrator number 3

Fig. 3.8 Plane calibrator's for SPIV/SPTV.

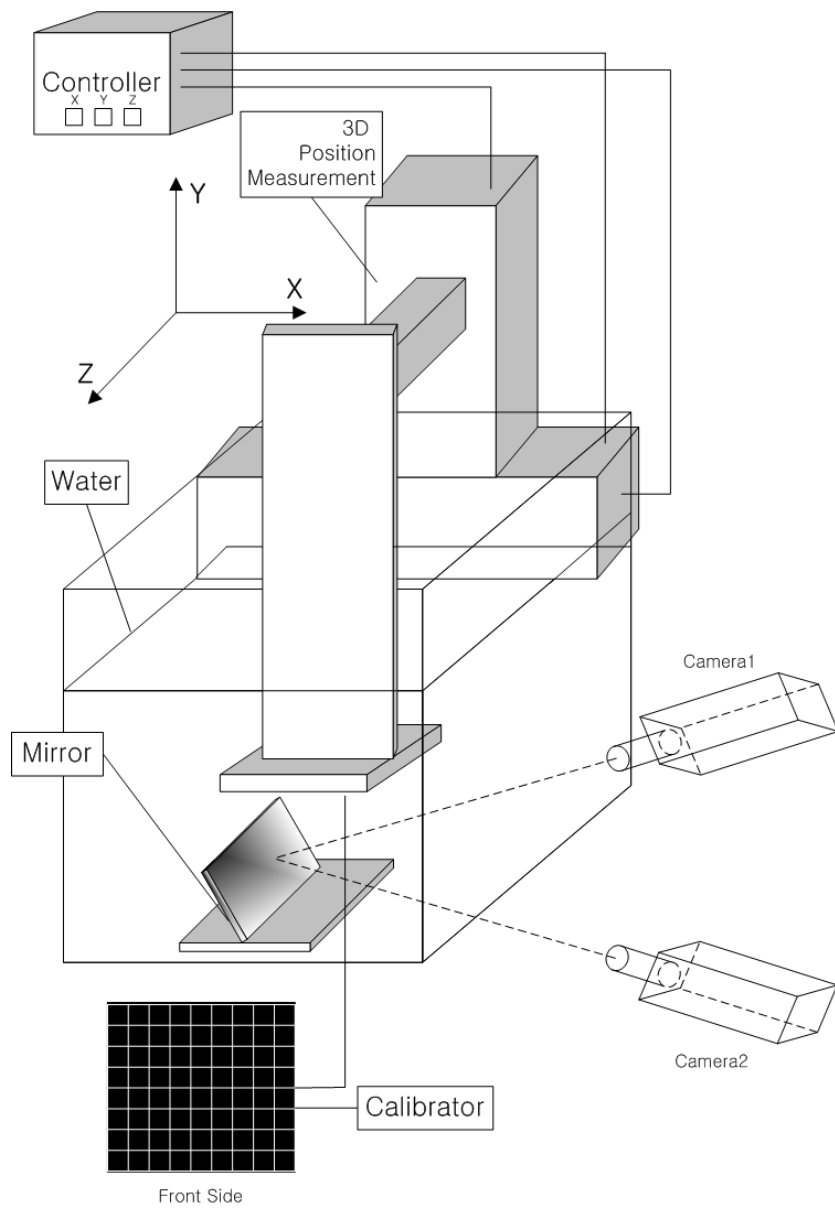
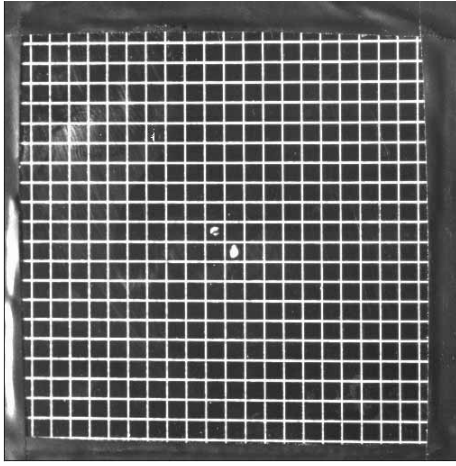
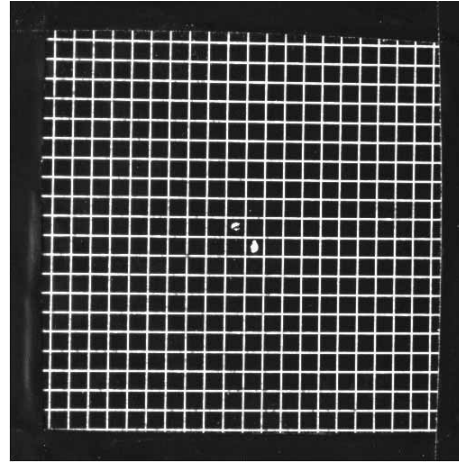


Fig. 3.9 Schema of mirror reflection system for calibration under the water.

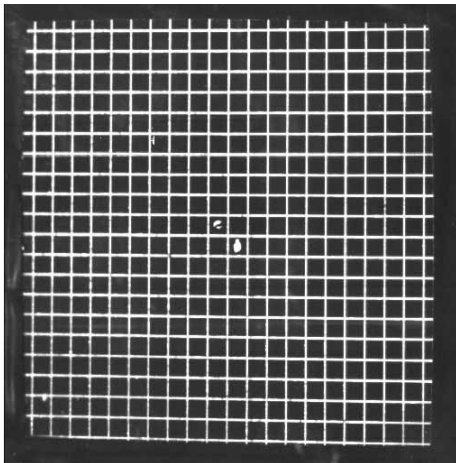


(a) Camera 1's image at $z=0\text{mm}$

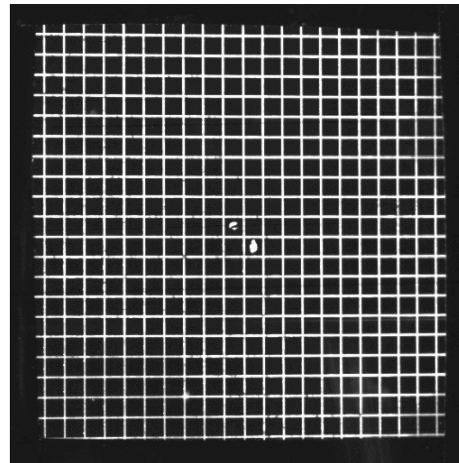


(b) Camera 2's image at $z=0\text{mm}$

Fig. 3.10 Plane calibrator 1 (air / camera angel 30).

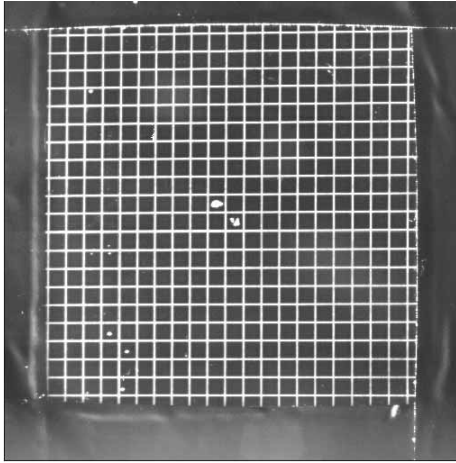


(a) Camera 1's image at $z=0\text{mm}$

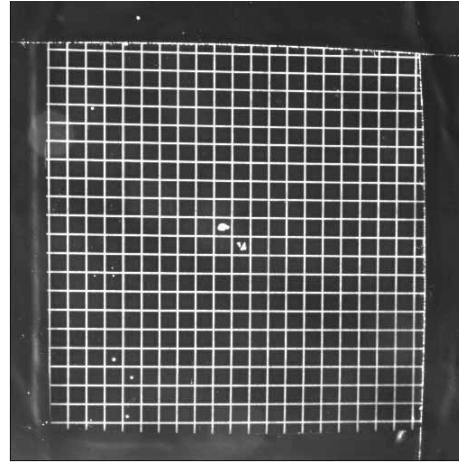


(b) Camera 2's image at $z=0\text{mm}$

Fig. 3.11 Plane calibrator 1 (water / camera angel 30).

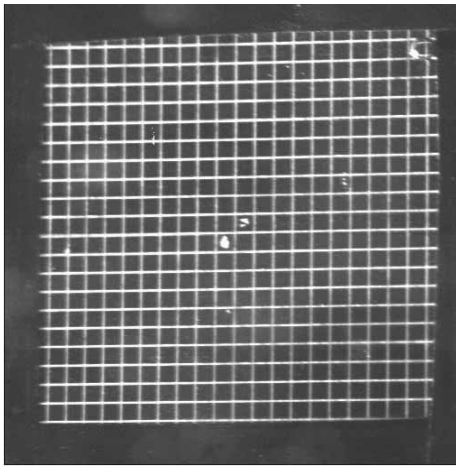


(a) Camera 1's image at $z=0\text{mm}$

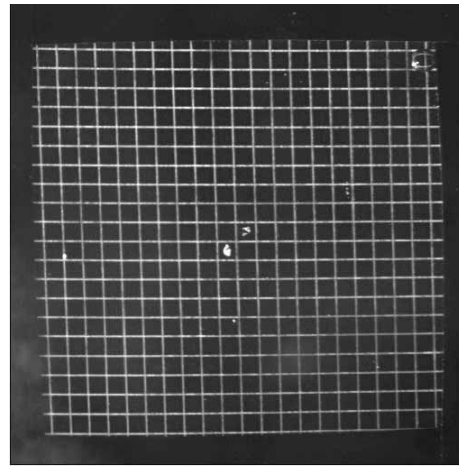


(b) Camera 2's image at $z=0\text{mm}$

Fig. 3.12 Plane calibrator 1 (air-mirror / camera angel 30°).



(a) Camera 1's image at $z=0\text{mm}$



(b) Camera 2's image at $z=0\text{mm}$

Fig. 3.13 Plane calibrator 1 (water-mirror / camera angel 30°).

Table 3.4 Error analysis of each calibrator for SPIV/SPTV.

	Air 3mm 30 deg			Air 3mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0745	0.0561	0.1010	0.0795	0.0593	0.1199
St deviation	0.0904	0.0670	0.1194	0.0917	0.0723	0.1446
	Water 3mm 30 deg			Water 3mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0638	0.0567	0.1744	0.0692	0.0582	0.1667
St deviation	0.0790	0.0689	0.2049	0.0832	0.0718	0.1992
	Air/Mirror 3mm 30 deg			Water/Mirror 3mm 30deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0705	0.0837	0.2290	0.1578	0.0946	0.7282
St deviation	0.0902	0.1032	0.3066	0.2122	0.1221	0.8450
	Air 4mm 30 deg			Air 4mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0384	0.0300	0.0458	0.0372	0.0293	0.0442
St deviation	0.0483	0.0382	0.0586	0.0469	0.0373	0.0545
	Water 4mm 30 deg			Water 4mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0541	0.0371	0.1486	0.0569	0.0332	0.1448
St deviation	0.0673	0.0488	0.1818	0.0705	0.0435	0.1743
	Air/Mirror 4mm 30 deg			Water/Mirror 4mm 30deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0695	0.0689	0.2121	0.0814	0.0904	0.3727
St deviation	0.0892	0.0916	0.2761	0.1065	0.1121	0.5116
	Air 5mm 30 deg			Air 5mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0600	0.0685	0.0693	0.0543	0.0690	0.0577
St deviation	0.0679	0.0770	0.0871	0.0626	0.0776	0.0718
	Water 5mm 30 deg			Water 5mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0920	0.0765	0.3287	0.0929	0.0783	0.3071
St deviation	0.1108	0.0915	0.4061	0.1130	0.0936	0.3788
	Air/Mirror 5mm 30 deg			Water/Mirror 5mm 30deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0767	0.0696	0.2976	0.0679	0.0564	0.3640
St deviation	0.0942	0.0855	0.3870	0.0865	0.0698	0.4617

3.5 유체-구조 연동운동 동시측정시스템

3.5.1 계측법의 원리

구조물의 운동을 파악하기 위해서는 각 시각영상으로부터 구조물에 표시된 동일한 표적물의 추적이 필요하다.

Fig. 3.14는 FSIMS의 순서도로써 구조물의 운동장과 유체의 유동장을 동시에 획득한 후, 구조물의 운동장과 유체의 유동장을 개별적인 알고리즘을 통하여 구하게 되며, 이 때 개별적인 연산에 의한 동시간의 운동장과 유동장을 측정할 수 있게 된다. 유동장의 측정은 3D PTV알고리즘을 적용하였으며, 구조물의 운동장은 Fig. 3.15와 같은 '양방향 운동 추적알고리즘(Bidirectional Motion Tracking algorithm)'⁽²⁶⁾을 사용하였다. 구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

제 1 시각 영상에서의 표적물(P_{11})이 제 2 시각 영상의 임의 크기의 탐색영역 내(반경 Sr_2 이내)에 자신의 표적물로 추정되는 후보(P_{21})를 기점으로 하여 재차 제1시각의 보다 작은 임의 크기의 탐색영역 내(반경 Sr_1)에 원래의 표적물(P_{11})이 발견되면 두 시각사이에서의 운동의 동일한 표적물로 간주하였다. 이 방법에서는 Sr_1 과 Sr_2 값의 설정에 따라서 동일 표적물의 발견이 잘 되지 않을 수도 있는데 본 연구에서는 Sr_1 을 15픽셀 Sr_2 를 20픽셀로 취함으로써 동일 표적물을 비교적 정확하게 찾을 수 있었다.

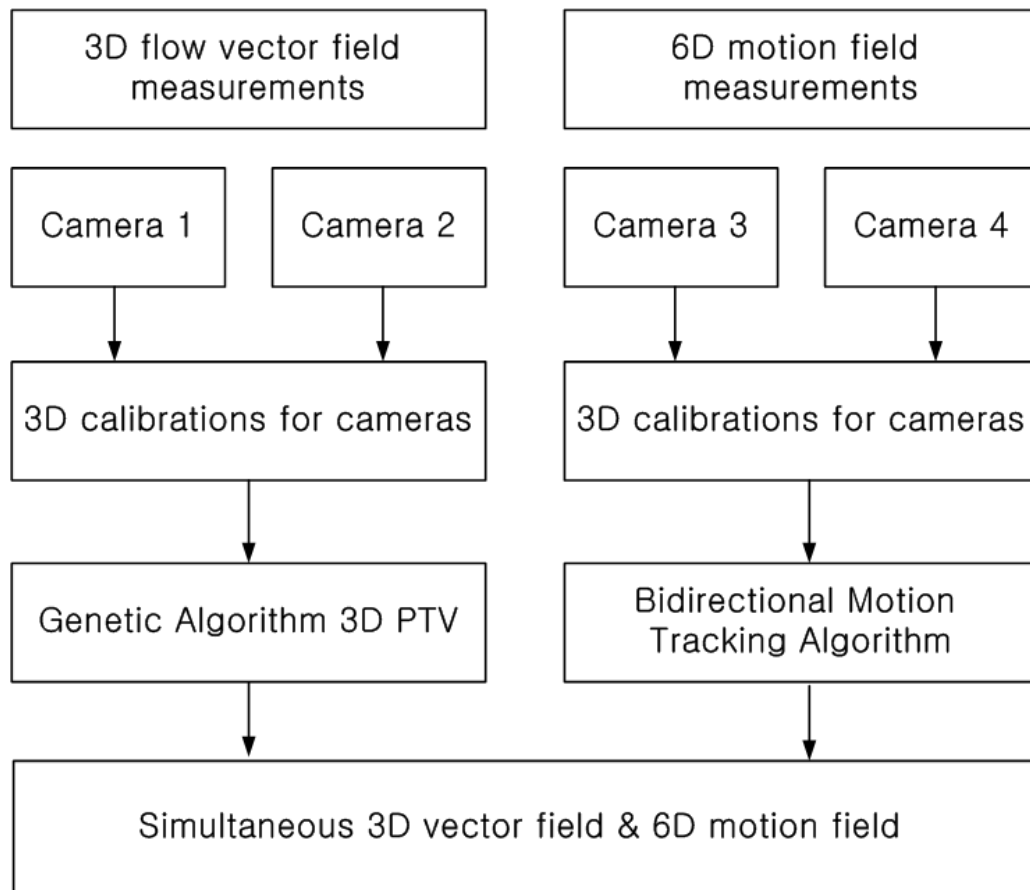


Fig. 3.14 Flowchart of FSIMS.

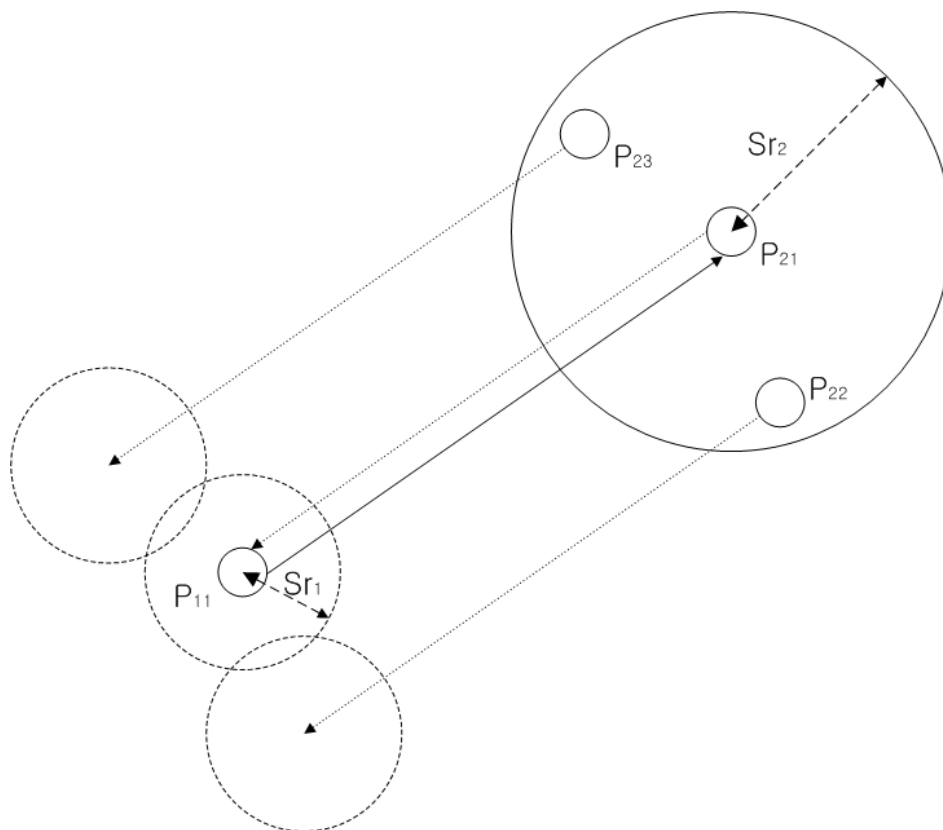


Fig. 3.15 Concept of Bidirectional Tracking algorithm.

3.5.2 양방향 운동 추적 알고리즘의 검증

구조물의 운동을 측정하기 위해 사용되어진 양방향 운동 추적 알고리즘 (Bidirectional Motion Tracking algorithm)에 대한 검증을 수행하였다. Fig. 3.16은 실제 교정기를 나타낸 것으로 110mm×100mm판 위에 총 41개의 직경 1mm인 핀이 불규칙하게 나열되어 있으며, 핀의 끝단에 지름이 0.6mm인 구가 있다. 이 때 이 구들의 절대좌표는 Table 3.6과 같다.

실제 교정기를 가상의 카메라로 획득한 영상으로 만들기 위하여 표준영상을 제작함에 있어 기존의 연구들⁽¹⁵⁾⁽³⁷⁾에서처럼 식 (3.5)와 같은 가우스분포함수를 사용하여 가상이미지를 생성하였다.

$$I(x,y) = I_0 \times \exp\left(-\frac{(x_p-x)^2 + (y_p-y)^2}{(d_p)^2}\right) \quad (3.5)$$

$I(x,y)$: 입자(x_p, y_p)로부터의 Scattering에 의한 (x,y) 에서의 강도

I_0 : 영상의 최대 강도

(x_p, y_p) : 입자중심

d_p : 입자 크기

식 (3.5)를 통하여 Fig. 3.17과 같은 가상 카메라에서의 교정기 영상을 재현할 수 있다. 입자중심 (x_p, y_p) 은 교정기의 절대좌표이며, 영상의 최대강도 I_0 는 200로 고정시켰고, 입자크기 d_p 는 6 pixel로 하였다. 입자중심 (x_p, y_p) 가 가우시안분포의 정점이 되며, 이를 중심으로 반경 18 pixel을 하나의 입자로

하여 영상의 강도를 변화시켰다. 가우스분포함수에서 입자의 경계를 어떻게 할 것인가에 대해 기존 문헌들에 있어 약간의 차이가 있다. 위 식 (3.5)는 입자 반경 위치에서 값이 최대값의 e^{-2} 배가 되도록 설정되어 있다. 이는 산란광의 약 95.4%가 존재하는 위치를 입자의 크기로 판단한 것이다. Willert와 Gharib⁽³⁸⁾은 $e^{-1/2}$ 배로서 68.3%의 산란광이 존재하는 위치를 입자 크기가 되도록 계수를 조정하였고, Okamoto 등⁽³⁷⁾은 e^{-1} 배로서 84.1%의 산란광 위치를 입자 경계로 설정하였다.

Fig. 3.17는 Table 3.6에 있는 절대좌표를 이용하여 가상의 카메라 1과 2에 의해 재현된 교정기의 영상을 나타낸 것으로, 2대의 가상 카메라 사이의 각은 30도로 하였다. 각각의 가상카메라에 투영된 2차원 사진좌표상에서 핀 끝단의 구에 대한 도심(Centroid)을 구하며, 이 사진좌표계와 교정기에 대한 절대좌표계를 이용하여 카메라의 표정요소를 구함으로써 각각의 가상카메라에 공간을 인식시킨다. 이 때 가상 카메라에 의해 획득되어진 교정기 영상의 도심을 구하기 위해서 다음과 같은 2가지 방법을 사용하였다. 첫째는 식 (3.6)과 같은 3차원 절대좌표를 가상카메라 좌표계로 투영시킬 때의 2차원 사진 좌표계를 도심으로 하여 생성한 가상입자에 영상처리를 실시하여 면적 모멘트법(Moment method of the area : MM)에 의해서 구하는 방식과 둘째는 교정기의 3차원 절대좌표를 가상카메라 좌표계로 투영시킬 때의 2차원 사진 좌표계를 도심으로 하는 가상포인트(Virtual point : VP)를 사용하는 방법이며, 상기 방법에 의한 도심을 사용하여 가상 카메라에 대한 표정요소를 Table 3.7와 같이 구하였다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3.6)$$

x_i, y_i : 입자를 구성하는 각 픽셀의 좌표

A_i : 각 픽셀의 면적

두 방법 모두 가상 카메라에 대한 표정요소가 거의 일치함을 확인할 수 있었으며, 다만 굴절율에 해당하는 k_1 과 k_2 값에 있어서 가상포인트 방법이 상대적으로 작음을 확인할 수 있었다. 이는 가상포인트 방법의 경우 교정기의 절대좌표계를 이용하여 가상의 카메라 센서면에 2차원으로 투영한 점을 바로 도심으로 사용하기 때문에 면적모멘트법을 이용하여 영상처리를 통해 구해진 도심에 비해 상대적으로 절대위치에서 벗어나는 정도가 작으므로 굴절율의 영향을 적게 받는 것으로 사료된다.

Table 3.8은 41개의 절대좌표와 절대좌표계를 2차원 사진 좌표계로 투영시킨 후 각각의 도심검출법을 사용하여 구한 가상의 카메라의 표정요소로부터 복원된 절대좌표간의 불확실성을 해석한 것으로써, 2대의 가상 카메라가 각각 15° 의 각을 가지고 있으므로, 이에 따른 z 축 오차가 x, y 축보다 큼을 확인하였다. 이는 z 축방향의 경우 가상의 카메라 센서면에 투영됨에 따른 투영오차가 존재하기 때문이다. 절대좌표계에 대한 복원된 절대좌표계간의 상대오차는 면적모멘트법에 의한 가상 카메라의 표정요소보다 가상포인트 방법에 의한 카메라의 표정요소가 상대적으로 작다는 것을 확인할 수 있

으며, 이는 상기 기술된 바와 같다.

즉 3차원 절대좌표계의 교정기를 2차원 사진좌표계로 투영시킬 때의 좌표값을 도식으로 하였기 때문에 이 사진좌표계로 카메라의 표정요소를 구한 후 다시 복원시키게 되면 원래의 절대좌표계와 거의 일치하게 됨으로 가상 포인트(virtual point) 방법이 면적모멘트법보다 상대적으로 오차가 작게 된다.

양방향 운동 추적알고리즘(Bidirectional Motion Tracking algorithm)을 검증하기 위하여 식 (3.5)을 사용하여 Fig. 3.18과 같이 가상의 실리콘판위의 입자들을 구현하였으며, Fig. 3.19는 첫 번째 프레임(frame)의 가상 실리콘판위의 입자들을 나타낸 것이다. 가상 실리콘 판의 크기(x, y)는 (-40~40, -40~40)의 정방형이며, 이 판위에 총 169개의 가상입자들을 등간격으로 분포시켰다. 또한 가상 실리콘 판은 Sine형태를 이루며, 진폭에 해당하는 z축은 180프레임이 1주기가 되도록 하였다.

가상영상을 위해 사용된 코드의 일부를 아래에 수록하였다.

```
ang := (n-1)*PI/180*2; // n : 프레임, 180 프레임 = 1주기
for j := 1 to 13 do begin
    tang := (j-1)/6*Pi; // 해당 입자별 Sine 형태 유지
    for i := 1 to 13 do pp^[j,i].z := 20*Sin(tang+ang) + 40;
end;
```

Fig. 3.20는 Fig. 3.18을 통해서 생성된 가상 실리콘 판을 45프레임간격

나타낸 것으로, 180프레임이 1주기임을 확인할 수 있으며, 이 Sine운동을 하는 가상 실리콘판 위의 추적점을 추적하여 프레임별 판의 거동을 살펴보게 된다.

Fig. 3.21은 Fig. 3.18를 통해 프레임별로 만들어진 가상 실리콘 판위의 추적점에 대한 거동을 가상포인트(VP) 방법과 면적모멘트법(MM)에 의해서 교정된 카메라의 표정요소를 사용하여 프레임별로 나타낸 것으로, Fig. 3.20의 Reference 거동을 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3.22은 생성된 가상 실리콘 판위의 가상 입자들의 움직임을 추적하고자 하는 입자위에 핑크색원으로 표시하였으며, 추적하고자 하는 입자의 표시 순서는 2대의 카메라 모두 일치하여야 한다.

또한 총 85개의 추적점 중 대표로 1~5까지의 흰색 숫자가 부여된 십자 선상의 추적점에 대해서만 이들 결과를 Fig. 3.23과 같이 그래프로 표시하였다. Fig. 3.23의 같은 수직선상의 (a) Point 1과 (e) Point 5는 Fig. 3.20에서 x축에 평행한 양끝단의 중앙지점에 해당하는 위치로써 프레임이 증가함에 따라 양끝단의 운동이 z축 방향으로 양의 방향으로 증가하다가 음의 방향으로 방향이 바뀌어 감소되어지는 것을 확인할 수 있으며, 운동 추적의 결과 그래프에서도 이러한 사실을 잘 반영하고 있다. 즉 z축이 +에서 -로 변하는 180프레임이 1주기인 Sine 형태를 보이고 있다. 또한 Fig. 3.23의 같은 수평 선상의 (b) Point 2, (c) Point 3 과 (d) Point 4는 Fig. 3.20에서 y축에 평행한 양끝단과 양끝단사이의 중앙에서의 중점에 해당하는 위치들로써 프레임이 증가함에 따라 z축 방향으로 음의 방향으로 감소하다가 양의 방향으로 방향이 바뀌어 증가되어지며, 이 또한 Fig. 3.23의 (b), (c) 와 (d)에서 잘 반

영하고 있다. 즉 z축이 -에서 +로 변하는 180프레임이 1주기인 Sine 형태를 나타내고 있다.

또한 Fig. 3.23은 단순히 가상 실리콘 판의 거동의 정성적으로 일치할 뿐만 아니라, 상시 제시된 코드를 통하여 계산되어진 Reference 운동과 면적모멘트법 및 가상포인트 방법에 의한 카메라의 표정요소들을 이용하여 추적한 결과들도 정량적으로 일치함을 나타내고 있다. 아울러 Reference 운동과 각각의 카메라 표정요소에 의한 운동 결과간의 상대오차에 따른 불확실성은 Table 3.9에 나타내었다. 이때, 상대오차는 각 방향의 Reference 운동에 대하여 각각의 면적모멘트법 및 가상포인트 방법에 의한 운동의 차이로 정의하였으며, 상대오차간의 평가는 식 (3.7)을 사용하여 평균 및 표준편차를 구하였다. 사용된 데이터는 추적점에 해당하는 5포인트에 대하여 각각의 방향에 따른 운동의 상대변위 결과인 179개를 사용하여 총 895개를 사용하였다.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \quad , \quad S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (3.7)$$

\bar{X} : 평균

S^* : 표준편차

가상 실리콘 판의 운동에 따른 양방향 운동 추적 알고리즘의 불확실성은 면적모멘트법이나 가상포인트 방법에 따른 차이가 거의 없었으며, 다만 Z축에 대한 운동의 오차가 다른 축에 비해서 상대적으로 크다는 것을 확인하였

다. 이는 전술되어진 바와 같이 z축 운동이 카메라 센서면에 투영됨에 따른 투영오차에 기인되는 것으로 사료된다. 또한 카메라의 표정요소를 구함에 있어 상기 제시된 바와 같이 가상포인트 방법이 면적모멘트법에 비해 상대 오차가 작으나, 실제 운동을 계측함에 있어서는 그 차이가 영향이 작음을 확인하였다.

따라서 FSIMS에 있어 양방향 운동 추적알고리즘의 불확실성 평가는 교정기를 통한 카메라의 표정요소와 양방향 운동 추적알고리즘을 고려하였다. 아울러 다음과 같은 식을 사용하여 운동장 추적 시스템의 불확실성을 평가하였다.

$$\nu_1 = \frac{(\sum_i S_{i1}^2)^2}{\sum_i \frac{S_{i1}^4}{\nu_{i1}}} , \nu = \nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \dots \quad (3.8)$$

$$S = \sqrt{\sum_j \sum_i S_{ij}^2} \quad (3.9)$$

$$B = \sqrt{\sum_j \sum_i B_{ij}^2} \quad (3.10)$$

$$U_{ADD} = U_{99} = \pm (B + t_{95} \cdot S) \quad (3.11)$$

$$U_{RSS} = U_{95} = \pm \sqrt{B^2 + (t_{95} \cdot S)^2}$$

$$u = \bar{X} \pm U_{ADD} , u = \bar{X} \pm U_{RSS} \quad (3.12)$$

ν : 시스템의 자유도

S : 우연오차(random error)

B : 고정오차(bias error)

U, u : 계측의 불확실성

여기서, 자유도 ν 는 각각의 사용된 데이터의 수로, 우연오차 S는 각각의 표준편차로, 고정오차 B는 각각의 상대오차의 평균으로 하였다. Table 3.5는 불확실성 평가를 위해 사용된 인덱스들에 대한 설명을 나타낸 것이다.

Table 3.5 List of index and explanation for each of it.

Index	Explanation
MM	면적모멘트법을 사용하여 도심을 구함
VP	가상포인트 방법을 사용하여 도심을 구함
CalX	캘리브레이션한 x축의 결과(averaged error)
CalY	캘리브레이션한 y축의 결과(averaged error)
CalZ	캘리브레이션한 z축의 결과(averaged error)
BMTAX	양방향 운동 추적 알고리즘을 적용한 x축의 결과 (averaged error)
BMTAY	양방향 운동 추적 알고리즘을 적용한 y축의 결과 (averaged error)
BMTAZ	양방향 운동 추적 알고리즘을 적용한 z축의 결과 (averaged error)
Motion○○SYSX	○○을 사용하여 도심을 구한 운동장 측정시스템의 x축 결과(averaged error)
Motion○○SYSY	○○을 사용하여 도심을 구한 운동장 측정시스템의 y축 결과(averaged error)
Motion○○SYSZ	○○을 사용하여 도심을 구한 운동장 측정시스템의 z축 결과(averaged error)

$$B_{MMCalx}=0.0008 \text{ , } S_{MMCalX}=0.0010 \text{ , } v_{MMCalX}=41$$

$$B_{MMCalY}=0.0009 \text{ , } S_{MMCalY}=0.0010 \text{ , } v_{MMCalY}=41$$

$$B_{MMCalZ}=0.0036 \text{ , } S_{MMCalZ}=0.0042 \text{ , } v_{MMCalZ}=41$$

$$B_{VPCalX}=0.0000 \text{ , } S_{VPCalX}=0.0000, v_{VPCalX}=41$$

$$B_{VPCalY}=0.0000 \text{ , } S_{VPCalY}=0.0000 \text{ , } v_{VPCalY}=41$$

$$B_{VPCalZ}=0.0001 \text{ , } S_{VPCalZ}=0.0001 \text{ , } v_{VPCalZ}=41$$

$$B_{MMBMTAX}=0.0059 \text{ , } S_{MMBMTAX}=0.6180, v_{MMBMTAX}=895$$

$$B_{MMBMTAY}=-0.0099 \text{ , } S_{MMBMTAY}=0.8274 \text{ , } v_{MMBMTAY}=895$$

$$B_{MMBMTAZ}=-0.1359 \text{ , } S_{MMBMTAZ}=0.8513 \text{ , } v_{MMBMTAZ}=895$$

$$B_{VPBMTAX}=0.0059 \text{ , } S_{VPBMTAX}=0.6171 \text{ , } v_{VPBMTAX}=895$$

$$B_{VPBMTAY}=-0.0084 \text{ , } S_{VPBMTAY}=0.8286 \text{ , } v_{VPBMTAY}=895$$

$$B_{VPBMTAZ}=-0.1368 \text{ , } S_{VPBMTAZ}=0.8514 \text{ , } v_{VPBMTAZ}=895$$

$$\begin{aligned} v_{MotionMMSYSX} &= \frac{(S_{MMCalX}^2 + S_{MMBMTAX}^2)^2}{\frac{S_{MMCalX}^4}{v_{MMCalX}} + \frac{S_{MMBMTAX}^4}{v_{MMBMTAX}}} \\ &= \frac{(0.0010^2 + 0.6180^2)^2}{\frac{0.0010^4}{41} + \frac{0.6180^4}{895}} \\ &\doteq 895 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_{MotionMMSYSY} &= \frac{(S_{MMCulY}^2 + S_{MMBMTAY}^2)^2}{\frac{S_{MMCulY}^4}{\nu_{MMCulY}} + \frac{S_{MMBMTAY}^4}{\nu_{MMBMTAY}}} \\
&= \frac{(0.0010^2 + 0.8274^2)^2}{\frac{0.0010^4}{41} + \frac{0.8274^4}{895}} \\
&\doteq 895
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_{MotionMMSYSZ} &= \frac{(S_{MMCulZ}^2 + S_{MMBMTAZ}^2)^2}{\frac{S_{MMCulZ}^4}{\nu_{MMCulZ}} + \frac{S_{MMBMTAZ}^4}{\nu_{MMBMTAZ}}} \\
&= \frac{(0.0042^2 + 0.8513^2)^2}{\frac{0.0042^4}{41} + \frac{0.8513^4}{895}} \\
&\doteq 895
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_{MotionVPSYSX} &= \frac{(S_{VPCulX}^2 + S_{VPBMTAX}^2)^2}{\frac{S_{VPCulX}^4}{\nu_{VPCulX}} + \frac{S_{VPBMTAX}^4}{\nu_{VPBMTAX}}} \\
&= \frac{(0.0000^2 + 0.6171^2)^2}{\frac{0.0000^4}{41} + \frac{0.6171^4}{895}} \\
&= 895
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_{MotionVPSYSY} &= \frac{(S_{VPCulY}^2 + S_{VPBMTAY}^2)^2}{\frac{S_{VPCulY}^4}{\nu_{VPCulY}} + \frac{S_{VPBMTAY}^4}{\nu_{VPBMTAY}}} \\
&= \frac{(0.0000^2 + 0.8286^2)^2}{\frac{0.0000^4}{41} + \frac{0.8286^4}{895}} \\
&= 895
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_{Motion VPSYSZ} &= \frac{(S_{VPCalZ}^2 + S_{VPBMTAZ}^2)^2}{\frac{S_{VPCalZ}^4}{\nu_{VPCalZ}} + \frac{S_{VPBMTAZ}^4}{\nu_{VPBMTAZ}}} \\
&= \frac{(0.0001^2 + 0.8514^2)^2}{\frac{0.0001^4}{41} + \frac{0.8514^4}{895}} \\
&\doteq 895
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{Motion MMSYSX} &= \sqrt{(B_{MMCdX})^2 + (B_{MMBMTAX})^2} \\
&= \sqrt{(0.0008)^2 + (0.0059)^2} \\
&= 0.0060
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{Motion MMSYSY} &= \sqrt{(B_{MMCdY})^2 + (B_{MMBMTAY})^2} \\
&= \sqrt{(0.0009)^2 + (-0.0099)^2} \\
&= 0.0099
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{Motion MMSYSZ} &= \sqrt{(B_{MMCdZ})^2 + (B_{MMBMTAZ})^2} \\
&= \sqrt{(0.0036)^2 + (-0.1359)^2} \\
&= 0.1360
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{Motion VPSYSX} &= \sqrt{(B_{VPCdX})^2 + (B_{VPBMTAX})^2} \\
&= \sqrt{(0.0000)^2 + (0.0059)^2} \\
&= 0.0059
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{Motion VPSYSY} &= \sqrt{(B_{VPCdY})^2 + (B_{VPBMTAY})^2} \\
&= \sqrt{(0.0000)^2 + (-0.0084)^2} \\
&= 0.0084
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{Motion VPSYSZ} &= \sqrt{(B_{VPCdZ})^2 + (B_{VPBMTAZ})^2} \\
&= \sqrt{(0.0001)^2 + (-0.1368)^2} \\
&= 0.1368
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{MotionMMSYSX} &= \sqrt{(S_{MMCulX})^2 + (S_{MMBMTAX})^2} \\
&= \sqrt{(0.0010)^2 + (0.6180)^2} \\
&= 0.6179
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{MotionMMSYSY} &= \sqrt{(S_{MMCulY})^2 + (S_{MMBMTAY})^2} \\
&= \sqrt{(0.0010)^2 + (0.8274)^2} \\
&= 0.8274
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{MotionMMSYSZ} &= \sqrt{(S_{MMCulZ})^2 + (S_{MMBMTAZ})^2} \\
&= \sqrt{(0.0042)^2 + (0.8513)^2} \\
&= 0.8513
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{MotionVPSYSX} &= \sqrt{(S_{VPCulX})^2 + (S_{VPBMTAX})^2} \\
&= \sqrt{(0.0000)^2 + (0.6171)^2} \\
&= 0.6171
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{MotionVPSYSY} &= \sqrt{(S_{VPCulY})^2 + (S_{VPBMTAY})^2} \\
&= \sqrt{(0.0000)^2 + (0.8286)^2} \\
&= 0.8286
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{MotionVPSYSZ} &= \sqrt{(S_{VPCulZ})^2 + (S_{VPBMTAZ})^2} \\
&= \sqrt{(0.0001)^2 + (0.8514)^2} \\
&= 0.8514
\end{aligned}$$

자유도 v 가 모두 31이상이므로 $t_{95} = 1.96$ 을 사용하며, 이 때의 각 축에 대한 양방향 운동 추적알고리즘의 불확실성은 다음과 같다.

$$U_{Motion.MMSYSX,ADD} = U_{99} = \pm (B_{Motion.MMSYSX} + t_{95} \cdot S_{Motion.MMSYSX})$$

$$= \pm (0.0060 + 1.96 \cdot 0.6179) = \pm 1.2171$$

$$U_{Motion.MMSYSY,ADD} = U_{99} = \pm (B_{Motion.MMSYSY} + t_{95} \cdot S_{Motion.MMSYSY})$$

$$= \pm (0.0099 + 1.96 \cdot 0.8274) = \pm 1.6316$$

$$U_{Motion.MMSYSZ,ADD} = U_{99} = \pm (B_{Motion.MMSYSZ} + t_{95} \cdot S_{Motion.MMSYSZ})$$

$$= \pm (0.1360 + 1.96 \cdot 0.8513) = \pm 1.8046$$

$$U_{Motion.VPSYSX,ADD} = U_{99} = \pm (B_{Motion.VPSYSX} + t_{95} \cdot S_{Motion.VPSYSX})$$

$$= \pm (0.0059 + 1.96 \cdot 0.6171) = \pm 1.215$$

$$U_{Motion.VPSYSY,ADD} = U_{99} = \pm (B_{Motion.VPSYSY} + t_{95} \cdot S_{Motion.VPSYSY})$$

$$= \pm (0.0084 + 1.96 \cdot 0.8286) = \pm 1.6325$$

$$U_{Motion.VPSYSZ,ADD} = U_{99} = \pm (B_{Motion.VPSYSZ} + t_{95} \cdot S_{Motion.VPSYSZ})$$

$$= \pm (0.1368 + 1.96 \cdot 0.8514) = \pm 1.8055$$

$$U_{Motion.MMSYSX,RSS} = U_{95} = \pm \sqrt{B_{Motion.MMSYSX}^2 + (t_{95} \cdot S_{Motion.MMSYSX})^2}$$

$$= \pm \sqrt{0.0060^2 + (1.96 \cdot 0.6179)^2} = \pm 1.2111$$

$$U_{Motion.MMSYSY,RSS} = U_{95} = \pm \sqrt{B_{Motion.MMSYSY}^2 + (t_{95} \cdot S_{Motion.MMSYSY})^2}$$

$$= \pm \sqrt{0.0099^2 + (1.96 \cdot 0.8274)^2} = \pm 1.6217$$

$$U_{Motion.MMSYSZ,RSS} = U_{95} = \pm \sqrt{B_{Motion.MMSYSZ}^2 + (t_{95} \cdot S_{Motion.MMSYSZ})^2}$$

$$= \pm \sqrt{0.1360^2 + (1.96 \cdot 0.8513)^2} = \pm 1.6742$$

$$U_{Motion.VPSYSX,RSS} = U_{95} = \pm \sqrt{B_{Motion.VPSYSX}^2 + (t_{95} \cdot S_{Motion.VPSYSX})^2}$$

$$= \pm \sqrt{0.0059^2 + (1.96 \cdot 0.6171)^2} = \pm 1.2095$$

$$U_{Motion.MMSYSY,RSS} = U_{95} = \pm \sqrt{B_{Motion.MMSYSY}^2 + (t_{95} \cdot S_{Motion.MMSYSY})^2}$$

$$= \pm \sqrt{0.0084^2 + (1.96 \cdot 0.8286)^2} = \pm 1.6241$$

$$U_{Motion.MMSYSZ,RSS} = U_{95} = \pm \sqrt{B_{Motion.MMSYSZ}^2 + (t_{95} \cdot S_{Motion.MMSYSZ})^2}$$

$$= \pm \sqrt{0.1368^2 + (1.96 \cdot 0.8514)^2} = \pm 1.6743$$

따라서, 상기 제시된 양방향 운동 추적알고리즘의 전체 불확실성은 계측의 불확실성 적용법에 따라 다소 차이는 있으나, 전반적으로 각축에 대하여 $\pm 1.2\text{mm}$, $\pm 1.6\text{mm}$, $\pm 1.6\text{mm}$ 의 불확실성을 갖는 것으로 확인되었다.

운동장 측정을 위해 구축되어진 양방향 운동 추적알고리즘의 검증을 위하여 상용화 제품인 Krypton(벨기에 제작)사의 K400CMM와 비교 실험을 수행하였다. Fig. 3.24은 K400CMM의 구성 시스템을 나타낸 것으로 (a)와 같이 LED가 달린 공간교정기와 (b)와 같은 3대의 CCD가 직렬로 연결된 장치를 이용하여 공간을 인식시킨 후 측정하고자 하는 대상의 운동을 측정하게 된다. 검증의 대상으로는 Fig. 3.25과 같이 고정대 위에 탁구공 4개를 장축으로 650mm 단축으로 300mm 내외로 접착한 후 고정대 아래 설치된 지지대를 작동시켜 원하는 운동을 시키며, 이때 작동 운동에 따라 고정대 위의 탁구공이 카메라에서 사라질 수 있는데, 탁구공이 추적점이므로 사라지게 되면 운동장을 측정하지 못하게 되므로 추적점인 탁구공이 카메라에서 사라지지 않는 범위에서 부착지점을 조절하면서 실험을 반복 수행하였다.

Fig. 3.26은 운동을 측정하기 위하여 카메라 교정 작업을 하기 위한 평판

교정기를 나타낸 것이다. 격자 간격은 50mm이며, 평판의 크기는 x축 -500~500 mm, y축 -500~500mm이고 z축은 -400mm~400mm 까지 100mm간격으로 총 9회 이동시켰다.

Fig. 3.27은 양방향 운동 추적알고리즘의 검증을 위해 측정된 단일운동 및 2가지 이상의 복합운동에 대한 대표적인 결과인 (a) Sway, (b) Sway+Heave, (c) Sway+Heave+Surge를 그래프로 나타낸 것으로, 주어진 운동모드를 잘 추종함을 확인할 수 있었다.

Table 3.10는 상기 제시된 실험 장치를 통해 측정된 모든 운동모드에 대해 Krypton사와 양방향 운동 추적알고리즘간의 측정치와 상대오차를 나타내었으며, 이 결과 상용제품인 Krypton사의 K400CMM보다 운동 모드별 상대오차가 약 2배정도 작음을 확인할 수 있었다. 또한 Krypton사의 상용화 제품의 경우 LED가 달린 공간 교정기가 필요하며, 운동을 측정하고자하는 지점에 LED를 부착해야하는 번거로움이 있으나, FSIMS의 운동장 측정부에서는 LED가 필요하지 않으며 카메라에서 인식할 수 있는 표시만 있으면 된다. 아울러 Krypton사 제품의 경우 사용되는 공간 교정기에 의해 계측 공간의 제약이 있으나, 본 FSIMS의 경우 교정기를 일반 평판을 사용함으로써 평판의 크기를 얼마든지 축소 및 확대할 수 있으므로, 마이크로 스케일에서 매크로 스케일까지 모든 계측영역에 사용할 수 있는 광범위 측정의 장점이 있다.

따라서 본 FSIMS의 운동장 측정의 경우 장치의 간편함과 기존 상용제품에 비해 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

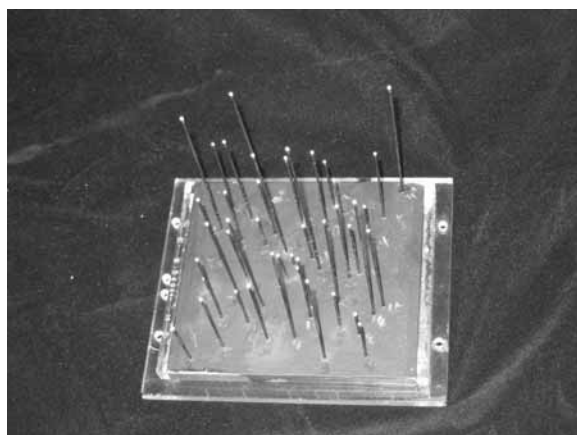


Fig. 3.16 Pin typed calibrator.

Table 3.6 Absolute coordination of calibrator's header.

No.	x	y	z	No.	x	y	z
1	-0.003	0	6.314	22	27.524	0.962	42.078
2	-44.45	-43.015	33.31	23	8.097	4.537	94.46
3	15.724	-39.756	68.602	24	-2.362	4.922	9.014
4	32.938	-39.052	29.479	25	-36.283	6.713	53.782
5	-31.211	-37.048	47.196	26	4.991	9.336	27.717
6	-10.608	-32.054	49.36	27	-8.515	10.114	82.093
7	1.831	-29.847	72.498	28	-16.98	15.539	22.916
8	29.355	-29.258	19.054	29	-28.162	18.047	42.155
9	21.083	-26.222	33.095	30	-37.092	22.168	91.507
10	8.382	-20.534	51.365	31	-12.933	19.969	47.426
11	-20.916	-24.452	30.119	32	-0.477	27.051	54.863
12	-32.643	-22.962	55.846	33	11.739	25.871	60.439
13	-16.379	-17.517	77.677	34	31.016	19.361	28.436
14	35.274	-16.236	89.174	35	37.443	31.842	50.96
15	37.6	-13.761	63.954	36	16.157	33.218	27.955
16	19.857	-10.544	65.308	37	13.616	37.226	36.375
17	-28.207	-11.339	64.606	38	-25.424	28.157	65.76
18	-40.821	-8.621	11.496	39	-33.374	34.511	54.862
19	-23.699	-4.104	46.176	40	-21.134	41.209	81.33
20	-5.92	-3.569	24.247	41	43.956	44.596	80.761
21	24.332	-1.135	60.957				

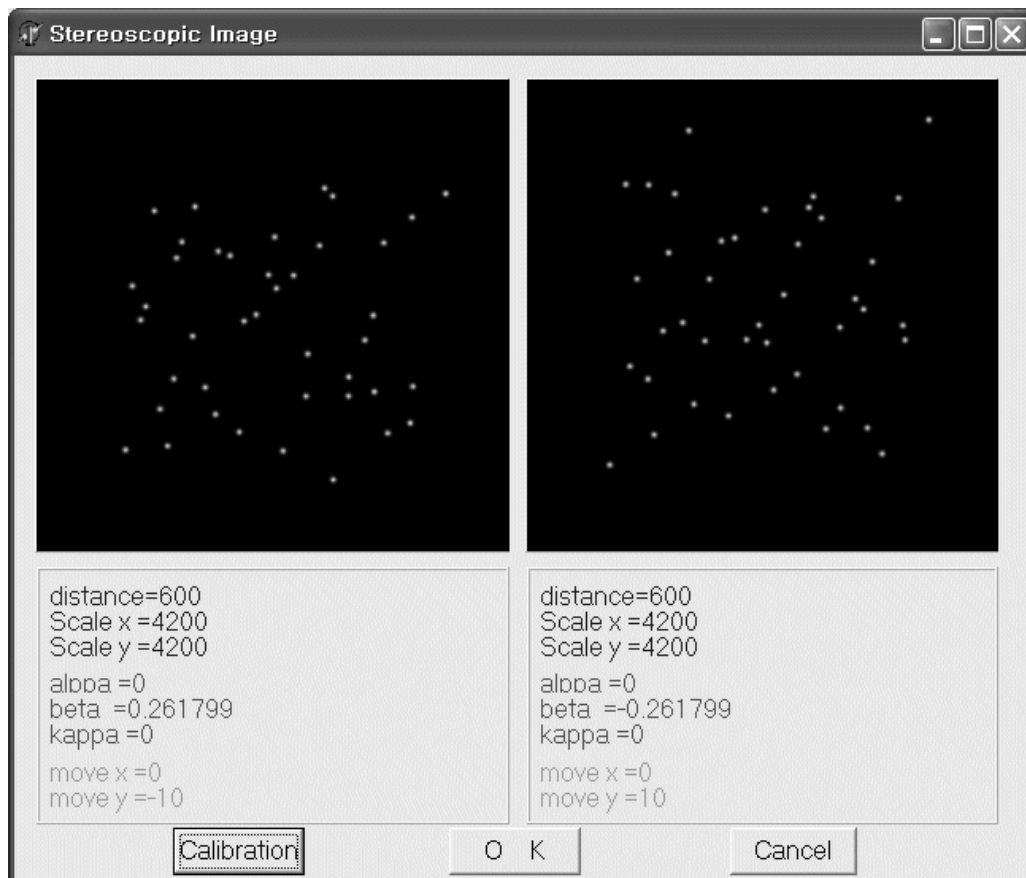


Fig. 3.17 Real calibrator's image for virtual camera 1 and camera 2.

Table 3.7 Virtual camera parameters of each centroid tracking method.

	Centroid using Virtual Point		Centroid using Moment Method	
Parameter	Virtual Cam1	Virtual Cam2	Virtual Cam1	Virtual Cam2
dis (mm)	599.99957	600.00036	599.90973	600.05945
c_X (pixel)	4199.99658	4200.00244	4199.53955	4200.44629
c_Y (pixel)	4199.99658	4200.00292	4199.48975	4200.46387
ω ($^\circ$)	1.97727E-8	-4.94805E-8	-9.50706E-6	4.9283E-7
Ψ ($^\circ$)	0.26180	-0.26180	0.26179	-0.26180
κ ($^\circ$)	-1.52469E-8	-2.80223E-8	6.70973E-6	2.07719E-6
m_X	-4.67221E-7	-2.52919E-6	-4.75010E-4	-1.04989E-4
m_Y	-10.00000	10.00000	-9.99936	9.99982
k_1	7.75179E-11	-0.00000	2.80433E-7	-3.96361E-8
k_2	-4.30000E-16	0.00000	-9.47270E-13	1.79650E-13

Table 3.8 Uncertainty analysis for each centroid tracking method of virtual camera's parameter.

Virtual Point	x	Ave. Error	0.0000
		Standard Deviation	0.0000
	y	Ave. Error	0.0000
		Standard Deviation	0.0000
	z	Ave. Error	0.0001
		Standard Deviation	0.0001
Moment Method	x	Ave. Error	0.0008
		Standard Deviation	0.0010
	y	Ave. Error	0.0009
		Standard Deviation	0.0010
	z	Ave. Error	0.0036
		Standard Deviation	0.0042

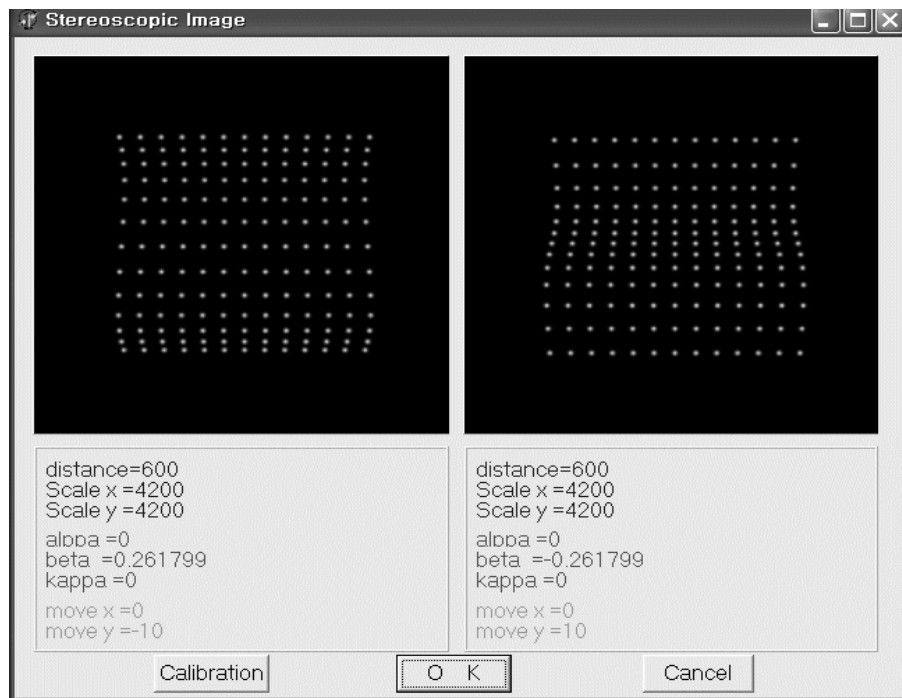
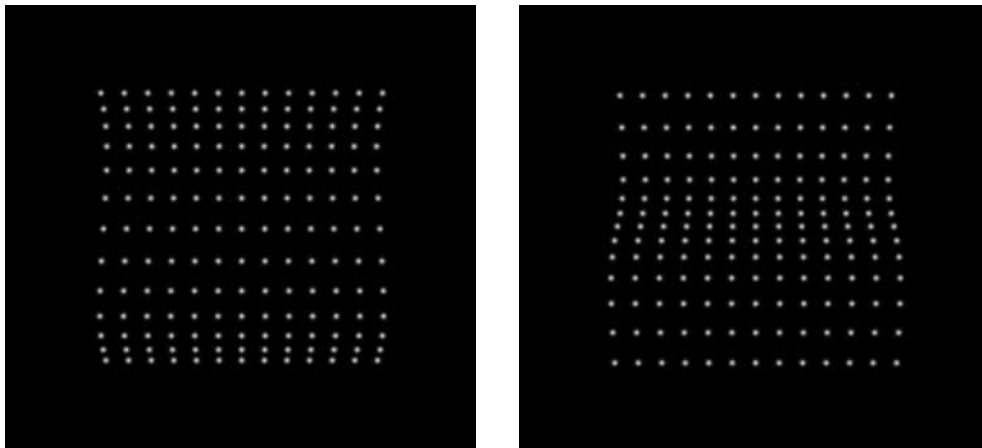


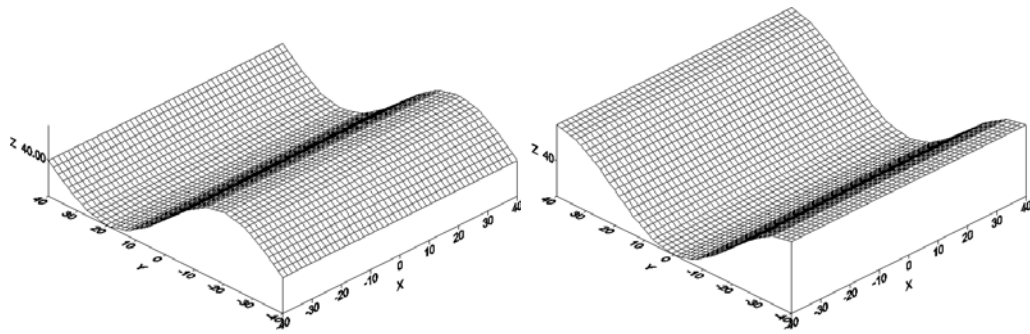
Fig. 3.18 Virtual plate image of each virtual cameras.



(a) Virtual camera 1's image

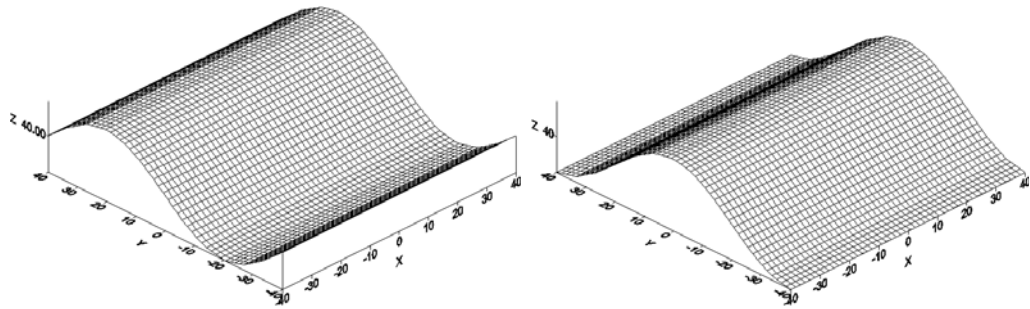
(b) Virtual camera 2's Image

Fig. 3.19 Virtual plate image for Virtual camera 1 and camera 2 by 1 frame.



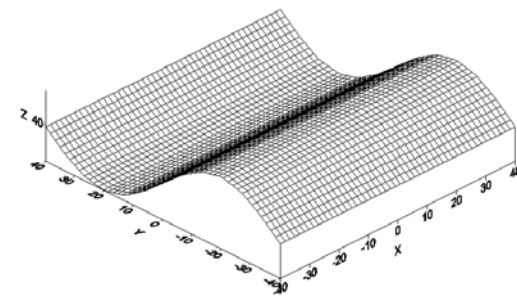
(a) 1 frame

(b) 45 frame



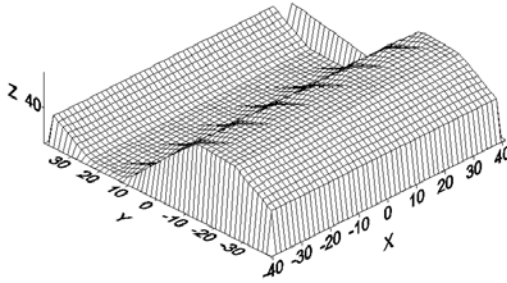
(c) 90 frame

(d) 135 frame

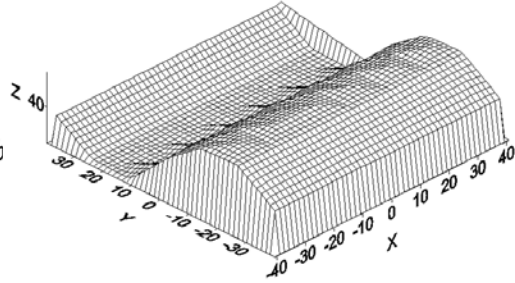


(e) 180 frame

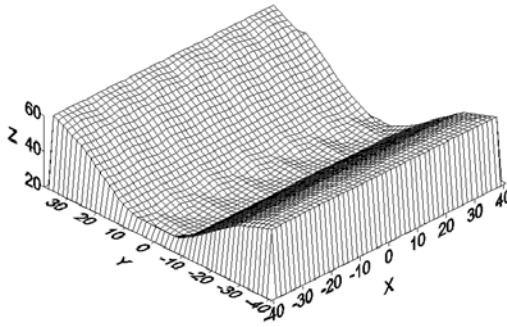
Fig. 3.20 Virtual plate motion by frame.



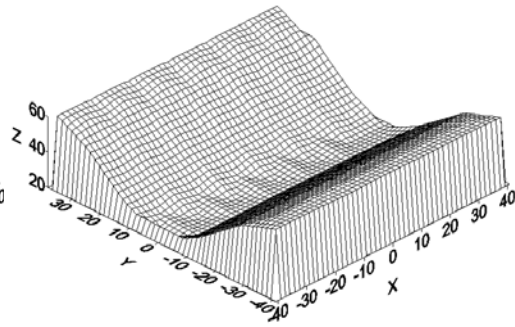
(a) VP result at 1 frame



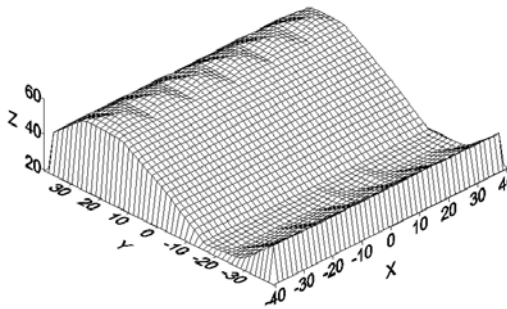
(b) MM result at 1 frame



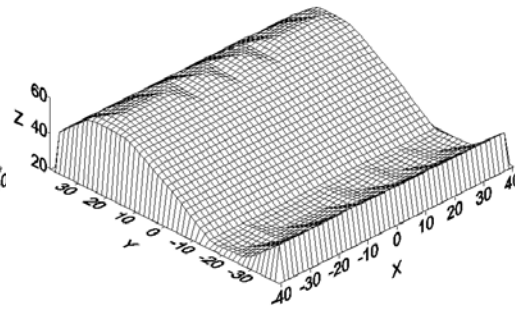
(c) VP result at 45 frame



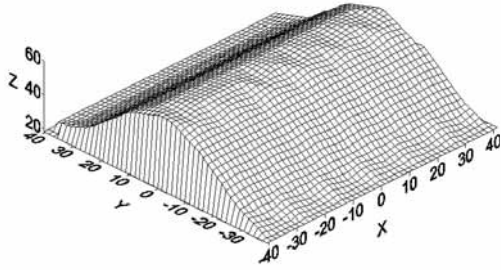
(d) MM result at 45 frame



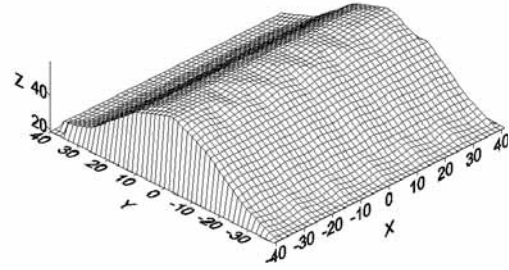
(e) VP result at 90 frame



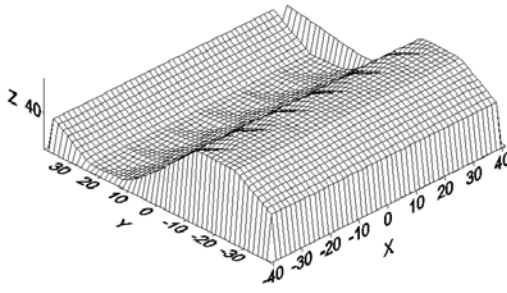
(f) MM result at 90 frame



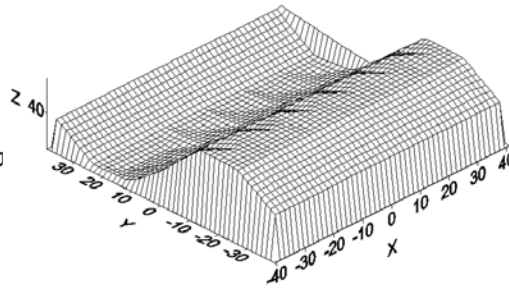
(g) VP result at 135 frame



(h) MM result at 135 frame



(i) VP result at 180 frame



(j) MM result at 180 frame

Fig. 3.21 Motion tracking results of the virtual plate with each method.

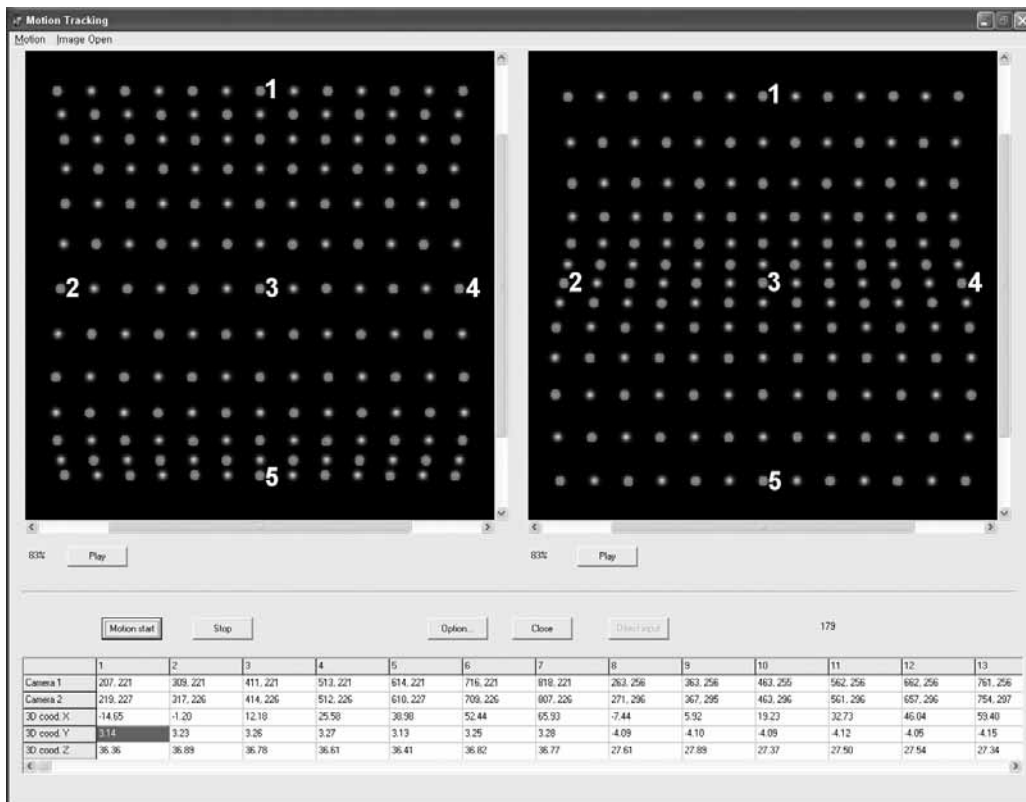
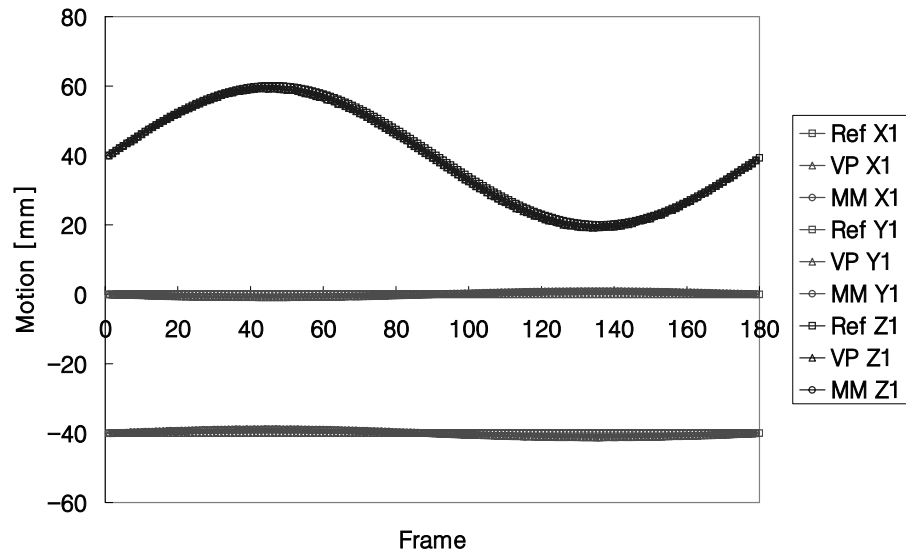
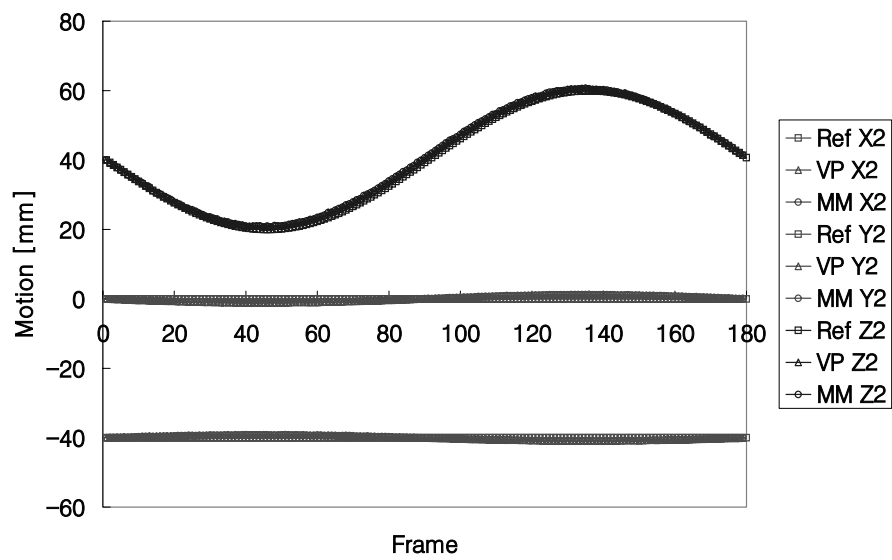


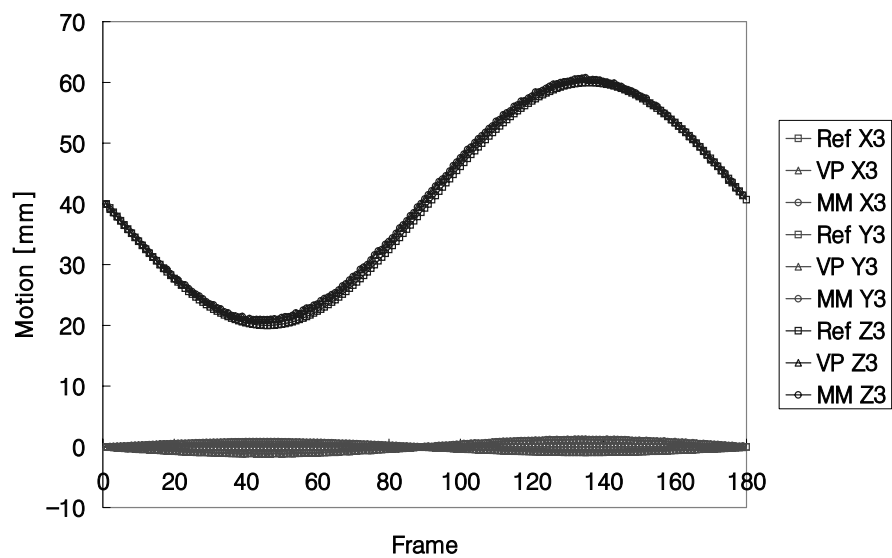
Fig. 3.22 Virtual particles on the virtual silicon plate and Pink circle is marked for motion tracking.



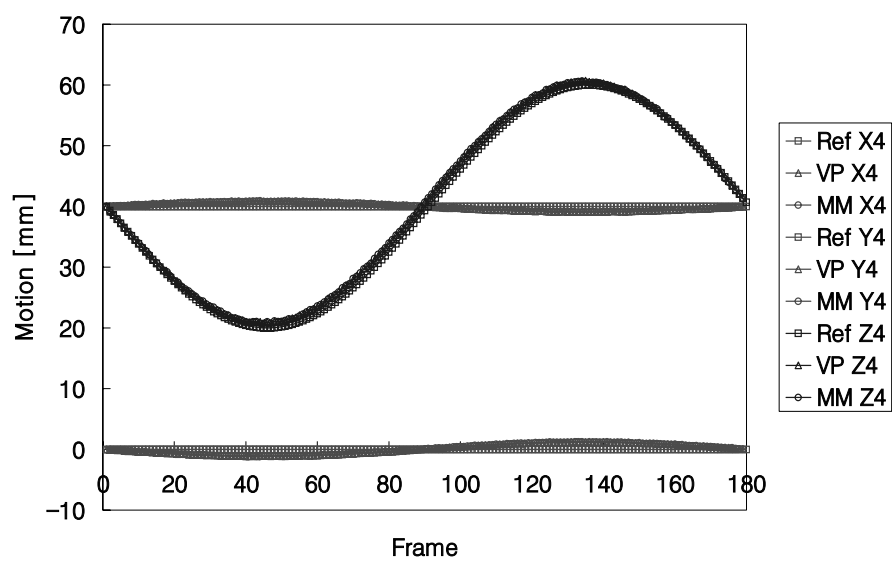
(a) Result of motion tracking at point 1



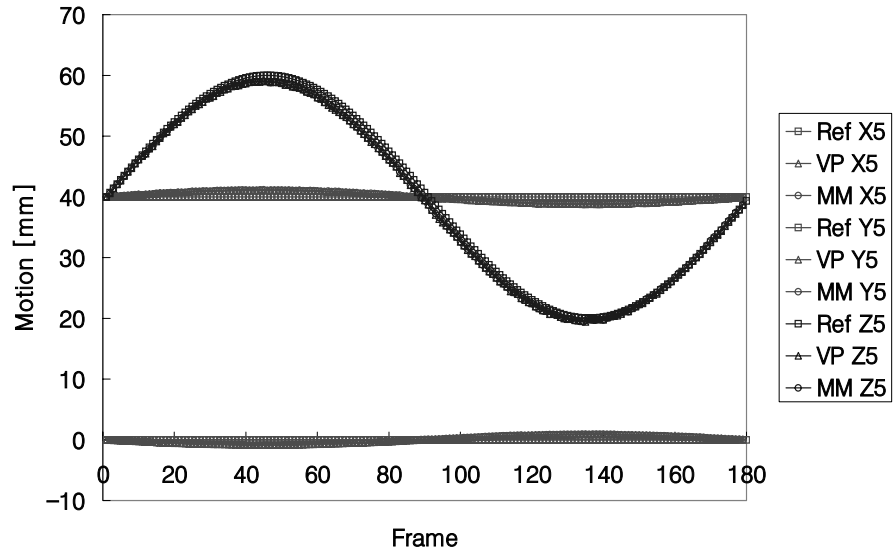
(b) Result of motion tracking at Point 2



(c) Result of motion tracking at Point 3



(d) Result of motion tracking at Point 4



(e) Result of motion tracking at Point 5

Fig. 3.23 Result of motion tracking of each points.

Table 3.9 Uncertainty analysis of motion tracking for each centroid tracking method.

	x		y		z	
	Virtual Point	Moment Method	Virtual Point	Moment Method	Virtual Point	Moment Method
Averaged error	0.005877	0.005922	-0.0084	-0.00989	-0.13676	-0.13593
Std. Deviation	0.617067	0.617909	0.8286	0.82737	0.851403	0.851336



(a) Space probe



(b) K400CMM by Krypton

Fig. 3.24 6 Degree motion tracking system by Krypton.

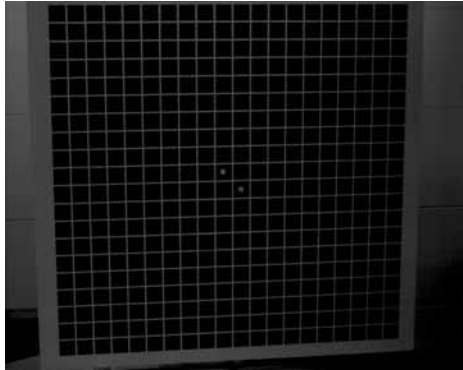


(a) Camera 1



(b) Camera 2

Fig. 3.25 Targets of motion tracking for verification of Bidirectional Motion Tracking algorithm.

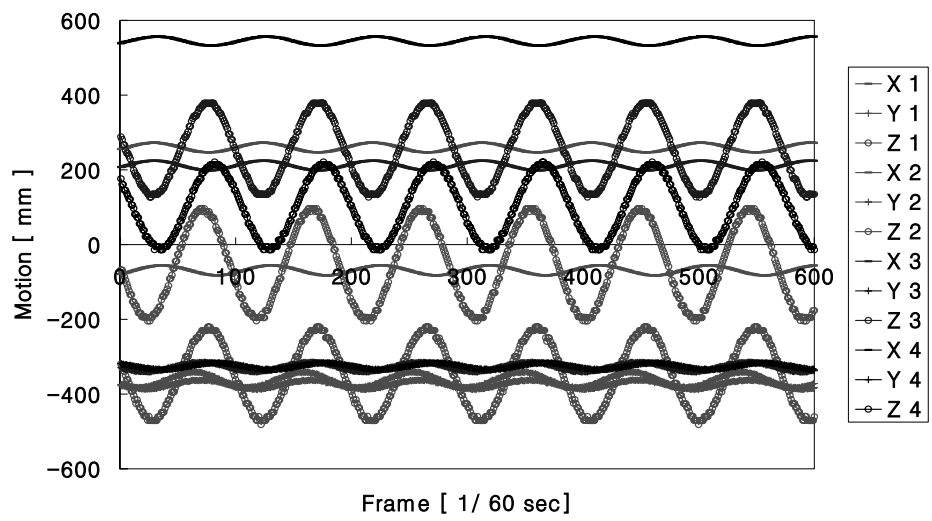


(a) Camera 1

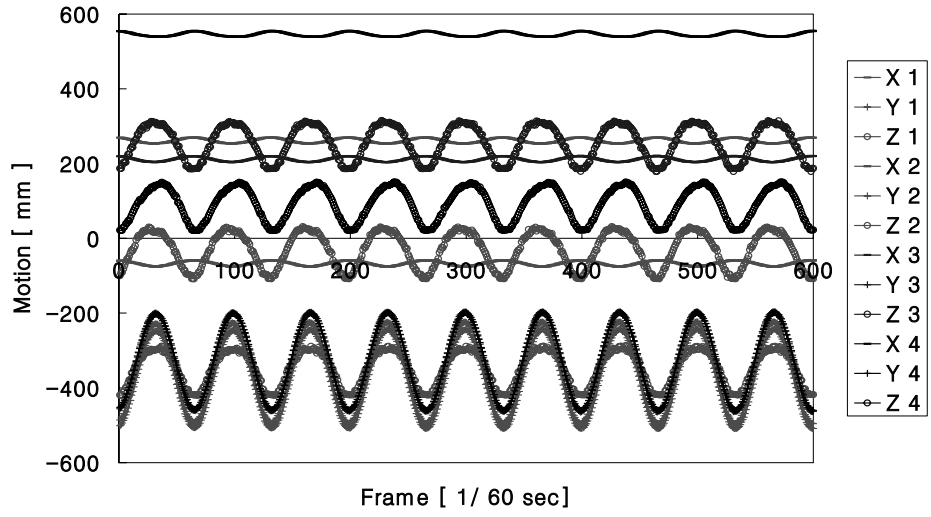


(b) Camera 2

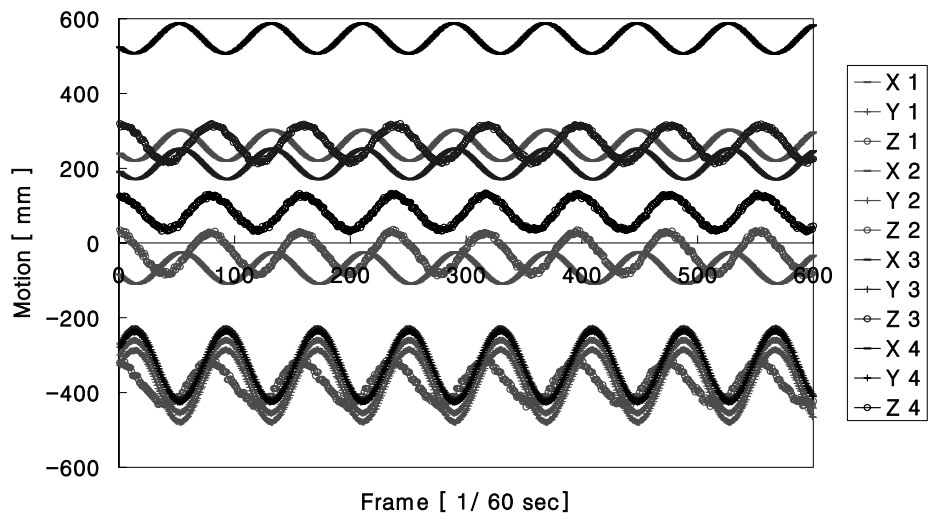
Fig. 3.26 Calibrator image for motion tracking.



(a) Motion mode : Sway



(b) Motion mode : Sway and Heave



(c) Motion mode : Sway, Heave and Surge

Fig. 3.27 Result of temporal motions of the four targets. in Sway.

Table 3.10 Motion Calibration Measurement Data.

Case	Motion Mode	Input Hz	System				
Case 1	Sway	0.636	Krypton	Output Hz		0.648	
				Relation Error	[%]	-0.012	1.89
			Bidirectional Motion T.A.	Output Hz		0.639	
				Relation Error	[%]	-0.003	0.47
Case 2	Surge	0.636	Krypton	Output Hz		0.638	
				Relation Error	[%]	-0.002	0.31
			Bidirectional Motion T.A.	Output Hz		0.637	
				Relation Error	[%]	-0.001	0.16
Case 3	Heave	0.636	Krypton	Output Hz		0.649	
				Relation Error	[%]	-0.013	2.00
			Bidirectional Motion T.A.	Output Hz		0.642	
				Relation Error	[%]	-0.006	0.94
Case 4	Pitch	0.5	Krypton	Output Hz		0.499	
				Relation Error	[%]	0.001	0.20
			Bidirectional Motion T.A.	Output Hz		0.499	
				Relation Error	[%]	0.001	0.20
Case 5	Sway Heave	0.9	Krypton	Output Hz		0.892	
				Relation Error	[%]	0.008	0.89
			Bidirectional Motion T.A.	Output Hz		0.896	
				Relation Error	[%]	0.004	0.44
Case 6	Sway Heave Surge	0.76	Krypton	Output Hz		0.750	
				Relation Error	[%]	0.010	1.32
			Bidirectional Motion T.A.	Output Hz		0.756	
				Relation Error	[%]	0.004	0.53

3.5.3 유체-구조 연동운동 동시측정시스템의 평가

FSIMS는 열유체의 유동장과 구조물의 운동장을 동시에 계측하는 시스템으로써 서로 다른 2가지의 알고리즘의 알고리즘이 사용된다. 이들 유동장과 운동장에 사용되는 알고리즘은 3.4절과 3.5.2절에서 각각 검증되었다. 이는 개별적인 알고리즘의 검증에 해당하며, 실제 FSIMS는 열유체와 구조물이 동시에 연동되므로 Fig. 3.28과 같은 열유체와 구조물의 동시연동을 위한 실험장치를 이용하여 유동장과 운동장을 계측하였다.

계측시스템은 4대의 카메라, 2대의 이미지 그래버 및 호스트컴퓨터로 구성된다. 2대의 카메라는 구조물의 운동을 나머지 2대의 카메라는 구조물의 유동장을 측정하기 위하여 설치하였으며 이들은 모두 동기화되어 있다.

Fig. 3.29와 같은 교정판을 사용하여 카메라로 하여금 공간을 인식시키는 교정작업을 수행하였다. Table 3.11은 구조물의 수력조건을 나타낸 것이며, Fig. 3.30은 구조물(9cm x 2.5cm)이 수조내부에 설치되었을 때의 개략도이다. 구조물의 운동을 측정하기 위하여 구조물 상부에 Fig. 3.31과 같이 표적물 4개를 설치하였다. Fig. 3.32와 Fig. 3.33은 구조물의 운동과 유체의 유동을 각각의 카메라를 통해 획득한 영상이며, 이 때 구조물은 1.33Hz(80rpm)로 작동하는 조파기(wave generator)에 의해 가진된 유체에 의해서 운동을 하게 된다. 동기화된 4대의 카메라로부터 획득되어진 구조물 운동과 유체 유동장을 상기 제시되어진 알고리즘을 통하여 해석하게 된다. Fig. 3.34은 유체 유동장의 평균유속과 구조물의 연동 해석을 위한 샘플링 포인트를 표시한 것으로, 좌표(-20, -170, 0)는 정수중의 실린더 수선면의 중심점에서

과상쪽으로 20mm, 수심 35mm의 위치를 말한다.

Fig. 3.35와 Fig. 3.36는 각각 샘플링 포인트에서의 시간에 따른 유체 유동장과 구조물의 운동변화를 그래프로 나타낸 것으로 15프레임과 25프레임 사이에서 구조물의 운동에 있어 x축방향으로 2차 모드가 발생하고 있으며, 이는 유동장에서 V/U_0 의 급격한 증가에 기인함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3.37은 구조물의 2차 모드일 때의 유동구조를 순시유동구조를 나타낸 것으로 유동그래프에서와 마찬가지로 V성분이 급격히 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 3.38은 구조물의 x축 운동이 최고점에 도달할 때의 유체 유동장의 순시유동구조를 나타낸 것으로 (a)를 보면 유체 유동이 표면에서 강하게 솟구침을 확인할 수 있으며, 강하게 솟구친 유체가 다음 프레임인 (b)에서 U와 반대방향으로 강하게 역류함과 동시에 하부에 강한 볼텍스를 형성함을 확인할 수 있으며, 이때 구조물의 하부에 역류와가 충돌함과 동시에 역류와를 경사면으로 해서 유동방향인 x축 방향으로 강하게 상승함을 확인할 수 있다. 이상에서와 같이 열유체 유동과 구조물의 운동간에는 연동운동이 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 열유체 유동장과 구조물의 운동에 대한 개별적인 알고리즘의 검증은 이루어졌으나, 이와 연계된 FSIMS의 평가는 이루어지지 않았다. 일반적으로 PIV/PTV에 있어서 알고리즘을 검증하기 위해서 수치해석 결과인 DNS 나 LES를 사용하나, 열유체-구조 연동운동의 경우 수치해석 결과 데이터를 확보할 수 없어서 상기 제시된 실험의 결과를 이용하여 가상영상으로 재구현하여 FSIMS를 평가하였다.

가상영상의 구현은 3.5.2절의 양방향 운동 추적알고리즘의 검증에 사용된 방법을 그대로 적용하여, 가상영상의 도심으로 열유체 유동장의 결과와 구조물의 운동변화를 사용하며, 실험에 사용된 4대의 카메라의 표정요소를 그대로 사용하였다.

Fig. 3.39는 실제 실험에 사용된 4대의 카메라 표정요소를 사용하여 4대의 가상 카메라에서의 가상 교정기 영상을 나타낸 것이며, Fig. 3.40은 실제 FSIMS의 결과를 이용하여 가상의 카메라로 재구현한 영상을 나타낸 것이다.

Fig. 3.41는 구조물의 운동을 실제 실험에 의한 영상과 실제 카메라 표정요소를 이용하여 재현한 가상영상을 나타낸 것이며, Fig. 3.42는 실제 유동장 영상과 재현한 가상 유동장 영상을 나타낸 것으로, 실제 영상과 가상 영상이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

실제 카메라 표정요소를 이용하여 구현된 가상 열유체 유동장과 구조물 운동과 실제 결과의 결과를 비교함으로써 FSIMS의 평가를 수행하였다.

Fig. 3.43은 FSIMS 중 운동장에 대한 것으로 실제 구조물의 운동결과와 이 결과를 Reference로 하여 가상으로 구현된 구조물의 운동결과를 그래프로 나타낸 것으로, 가상으로 구현된 4점의 운동이 실제 구조물의 운동과 거의 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 3.44은 FSIMS 중 유동장에 대한 것으로 실제 유동장의 결과와 이 결과를 Reference로 하여 가상으로 구현된 유동장의 결과를 비교한 것으로 실제 유동장과 거의 유사함을 확인할 수 있다.

상기 제시된 운동장과 유동장의 결과를 바탕으로 Table 3.12와 같은

FSIMS에서의 실제 실험결과에 대한 구현된 가상영상 결과 간의 상대오차에 따른 불확실성을 구하였다. 이 결과를 살펴보면, 유동장의 상대오차가 운동장에 비해 다소 큼을 확인할 수 있는데, 이는 복잡한 실제유동장의 계산 결과를 바탕으로 획득된 데이터를 기반으로 구현된 가상영상의 결과로써, 운동량과는 달리 상대적으로 겹쳐지는 입자로 인한 영향으로 사료된다. 또한 운동장의 경우 z 축의 상대오차가 유동장보다 크게 되는데 이는 운동장의 측정시 카메라 배치에 따른 z 축 성분이 카메라의 센서면에 투영됨에 따른 투영오차에 기인되는 것으로 사료된다.

전체 FSIMS의 평가를 상기와 같이 수행하였으며, 그 결과 공학적인 허용오차 범위 이하에서 운동장과 유동장을 정성적 및 정량적으로 추종함을 확인할 수 있었으며, 기존의 상용화 제품보다 성능이 우수하며, 시스템의 구성이 간편하며, 계측영역 제한의 한계를 극복할 수 있는 새로운 FSIMS를 구축하였다.

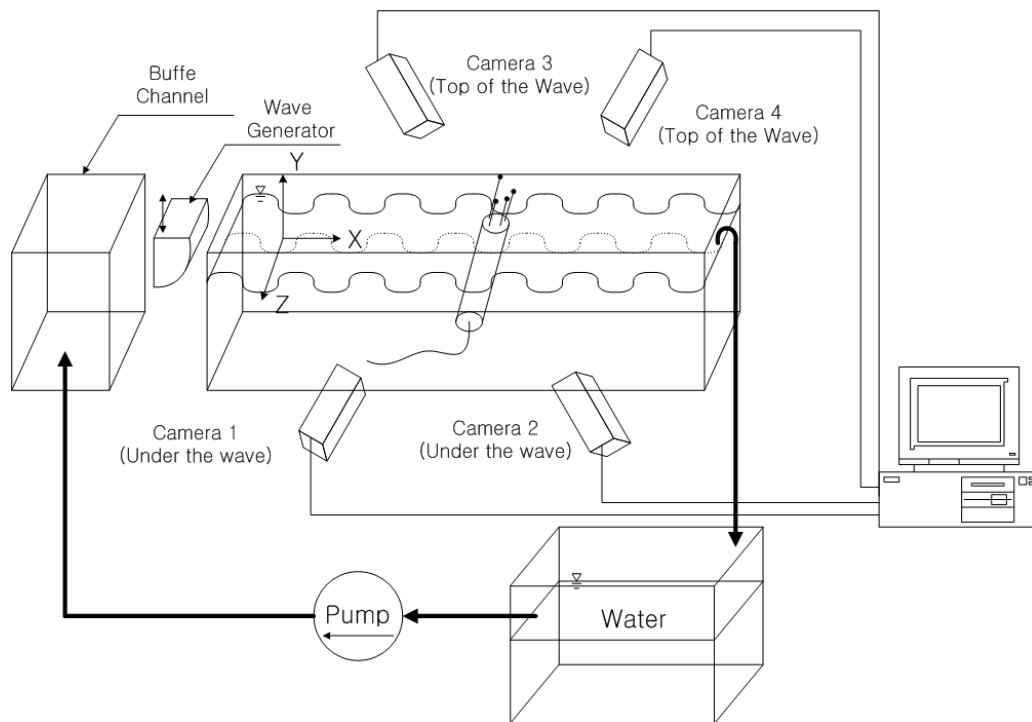


Fig. 3.28 Measurement system of verification of 3D FSIMS.

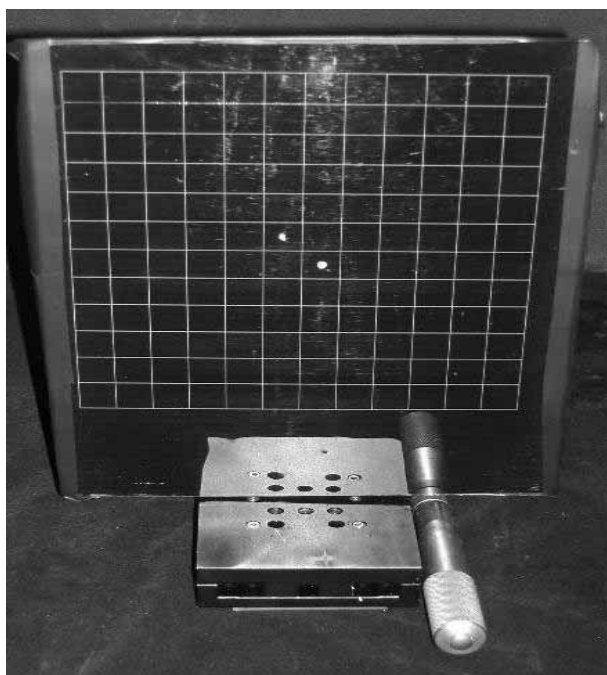


Fig. 3.29 Calibrator for cameras.

Table 3.11 Hydraulic condition of the cylinder.

Draft	0.05 m
Center of gravity	0.035 m
Weight	0.030 kgf
Displacement	0.114 kgf

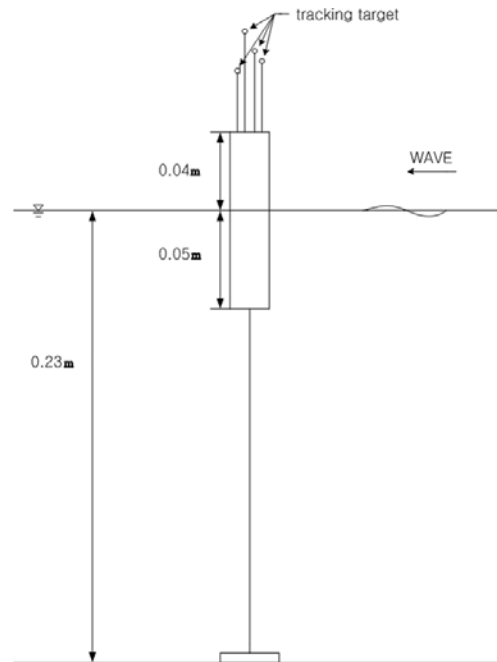


Fig. 3.30 Configuration of the vertical floating cylinder.

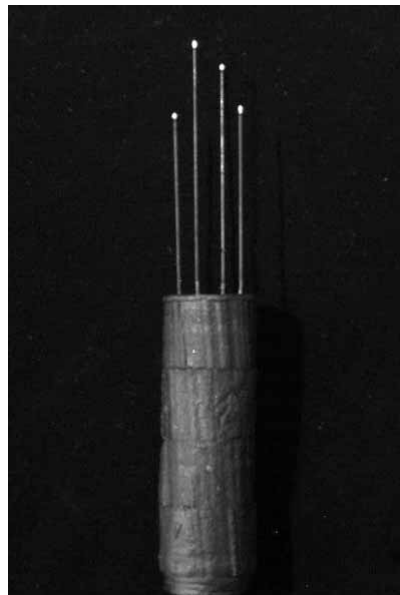
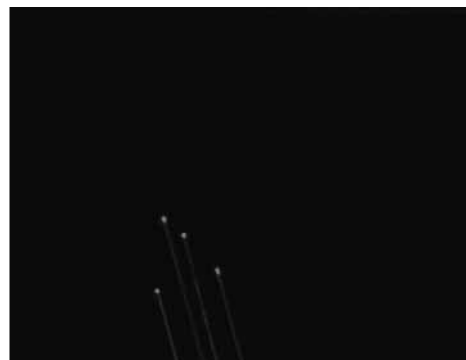


Fig. 3.31 Picture of floating structure for motion measurement.

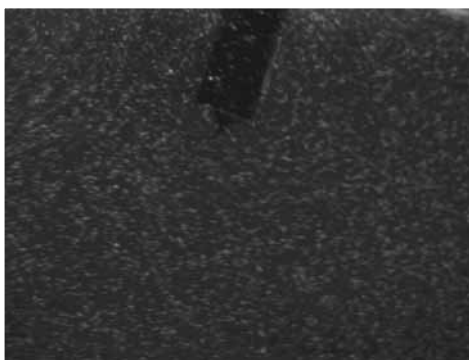


(a) image of camera 3

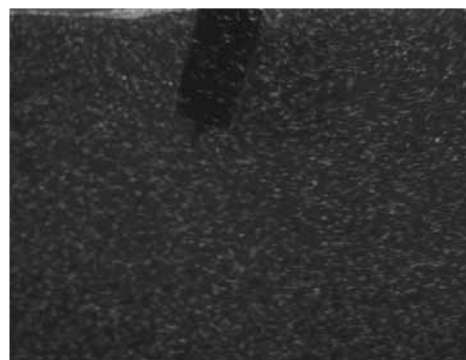


(b) image of camera 4

Fig. 3.32 Images of the measurements of structure motion.



(a) image of camera 1



(b) image of camera 2

Fig. 3.33 Images of flow fields.

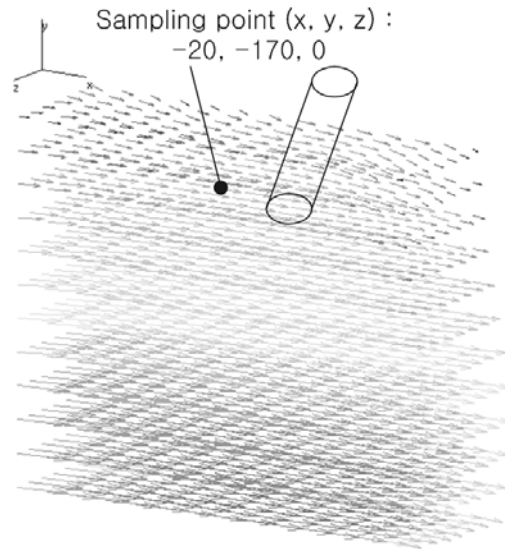


Fig. 3.34 Mean velocity distribution and sampling point $(-20, -170, 0)$.

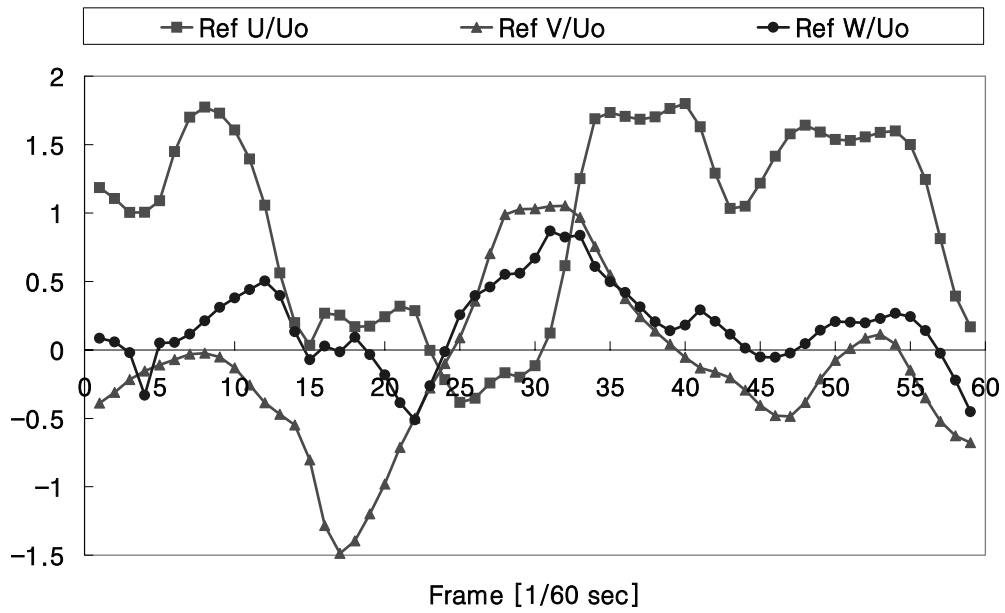


Fig. 3.35 Temporal evolutions of 3D vectors measured by 3D PTV at $x, y, z = (-20, -170, 0)$.

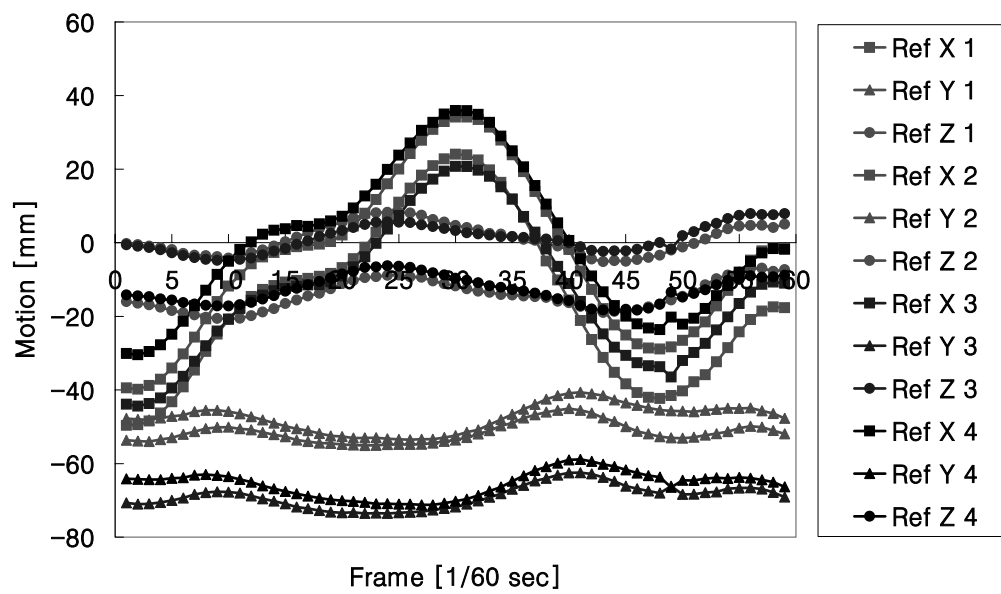
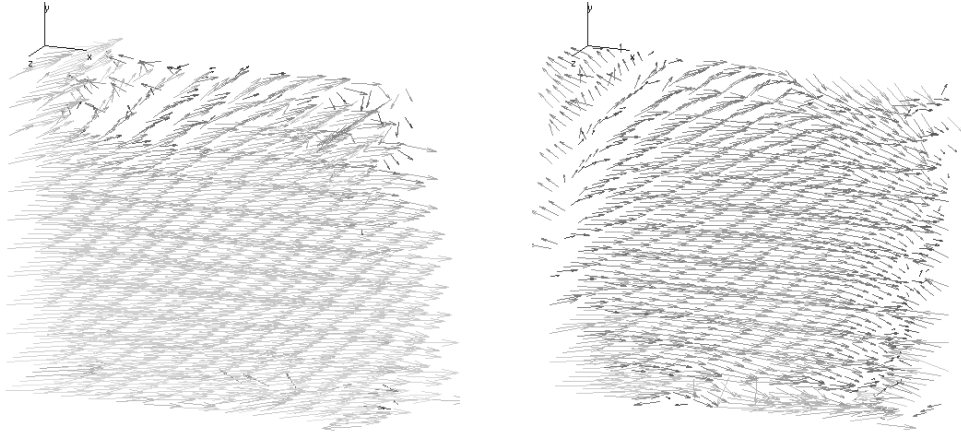
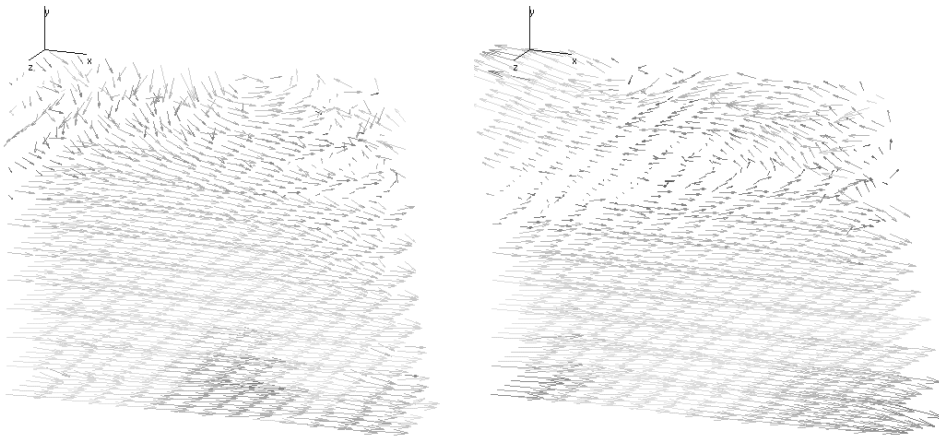


Fig. 3.36 Temporal motions of the four targets under the wave generator frequency 1.33 Hz.



(a) Flow Structure at 17 / 60 s (b) Flow Structure at 18 / 60 s

Fig. 3.37 Instantaneous flow structures at the second-mode motion.



(a) Flow Structure at 28 / 60 s (b) Flow Structure at 29 / 60 s

Fig. 3.38 Instantaneous flow structures at the highest-peak motion.

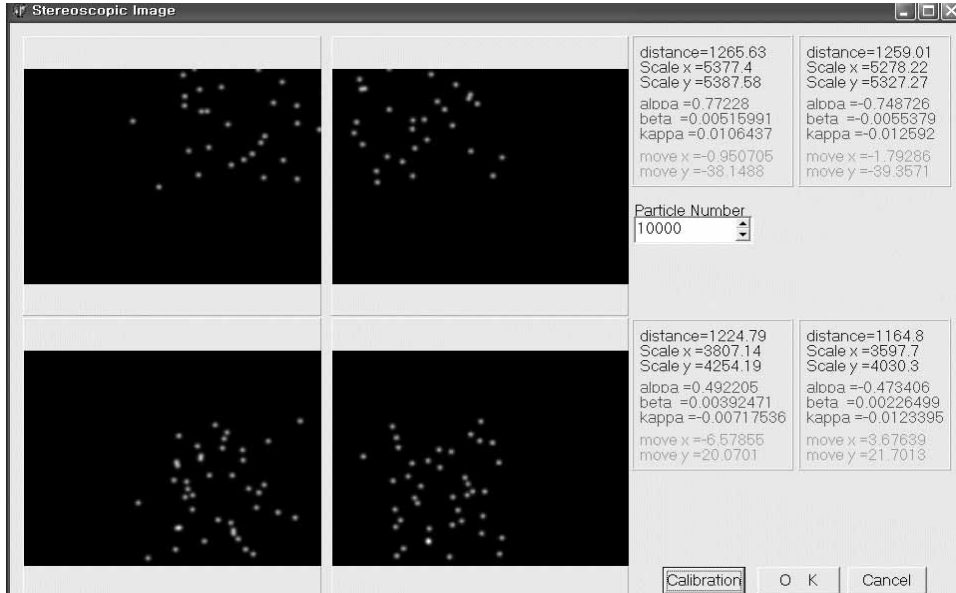


Fig. 3.39 Virtual calibration images of virtual camera using real camera parameters.

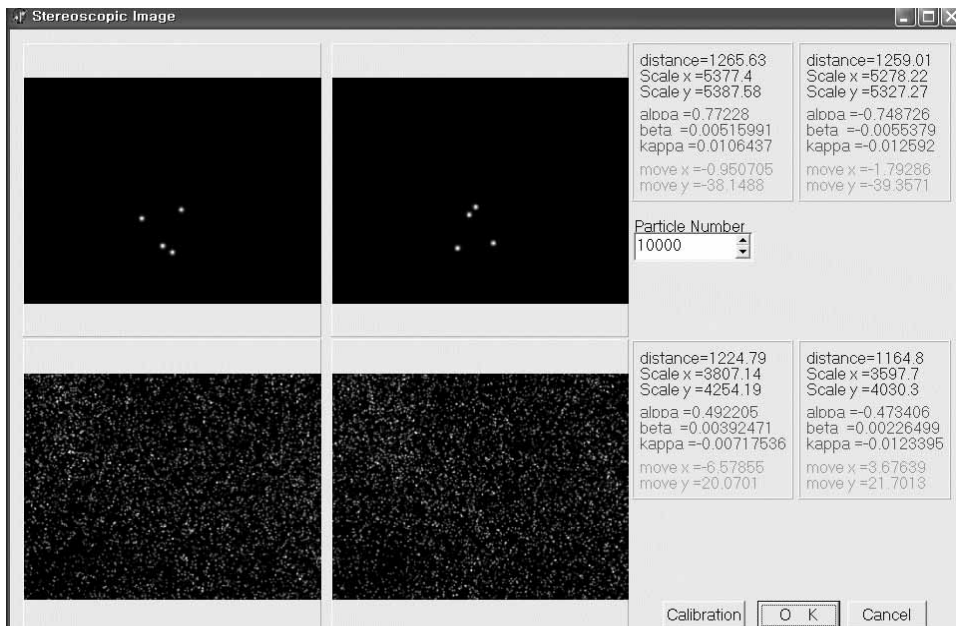
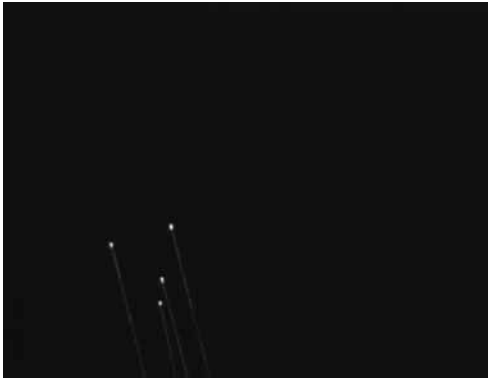


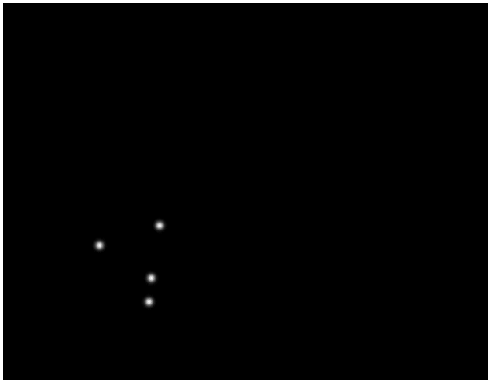
Fig. 3.40 Virtual experimental images of virtual camera using real 3D FSIMS's data.



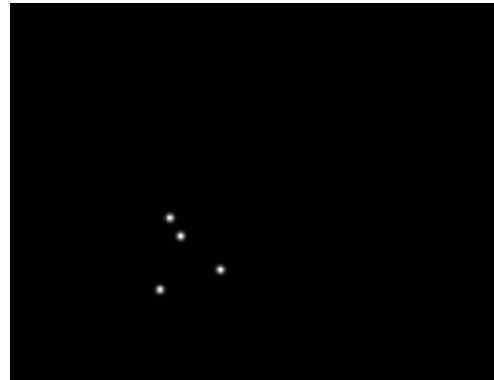
(a) Real structure motion image of camera 3



(b) Real structure motion image of camera 4

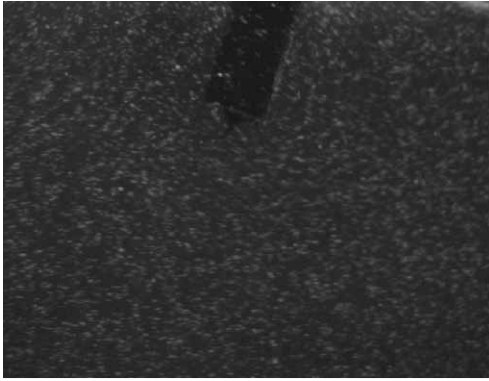


(c) Virtual structure motion image of camera 3

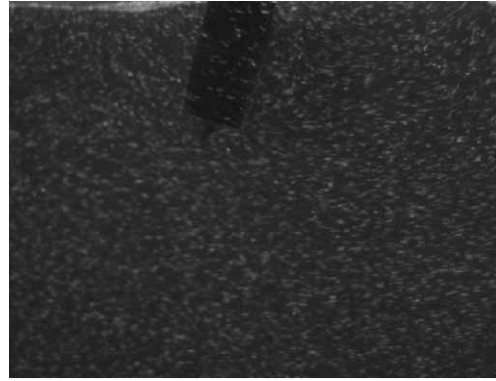


(d) Virtual structure motion image of camera 4

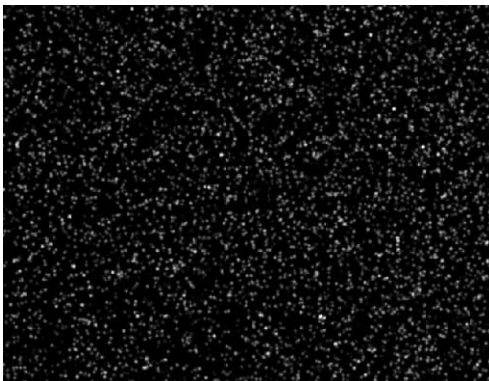
Fig. 3.41 Structure motion image between real camera and virtual camera.



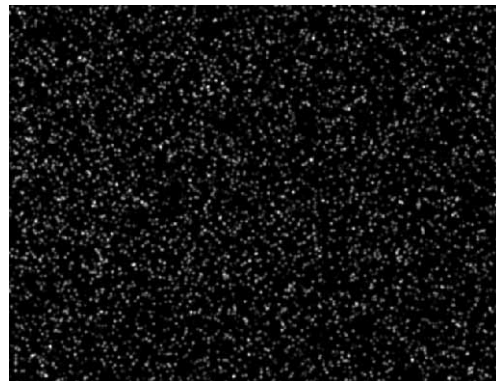
(a) Real flow field image of camera 1



(b) Real flow field image of camera 2

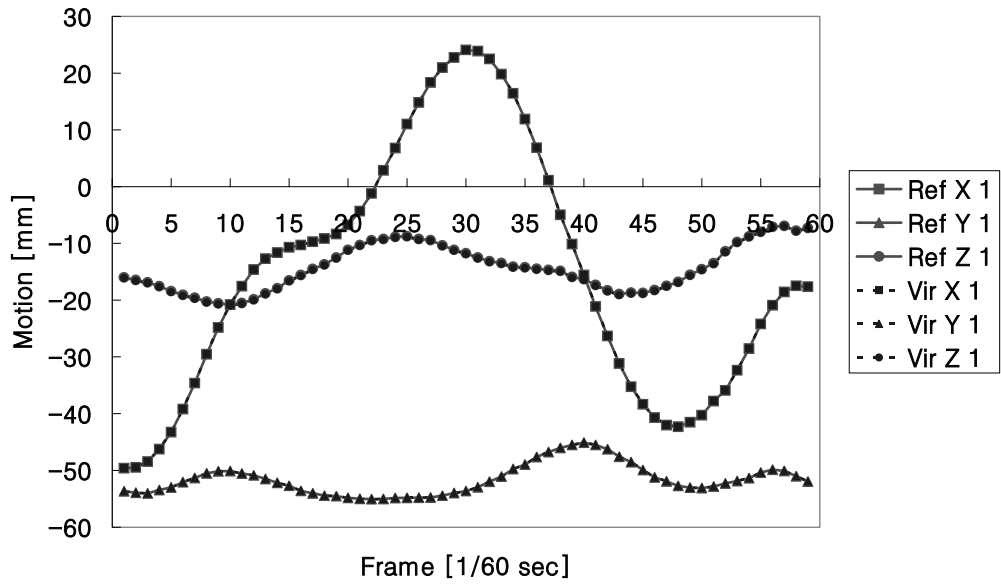


(c) Virtual flow field image of camera 1

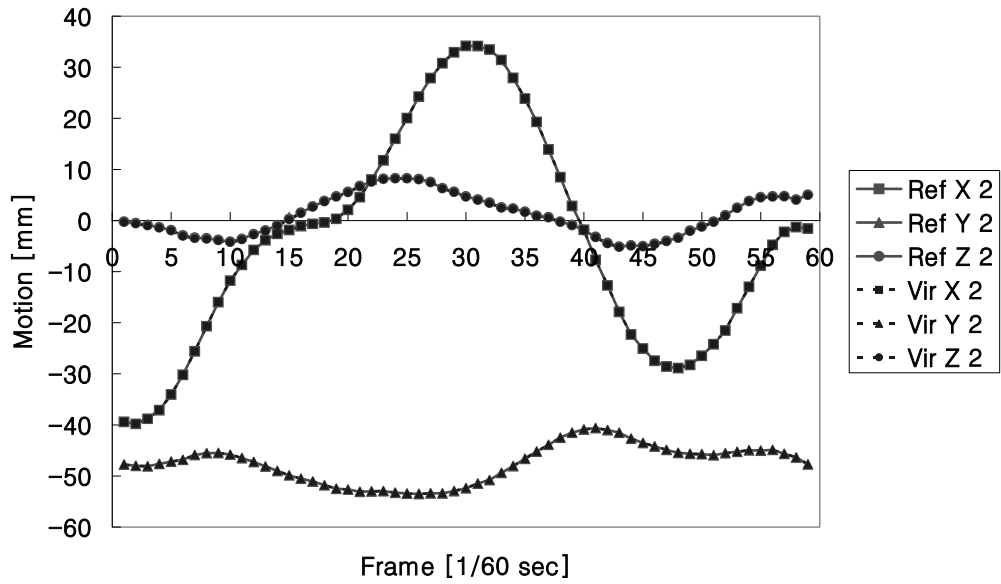


(d) Virtual flow field image of camera 2

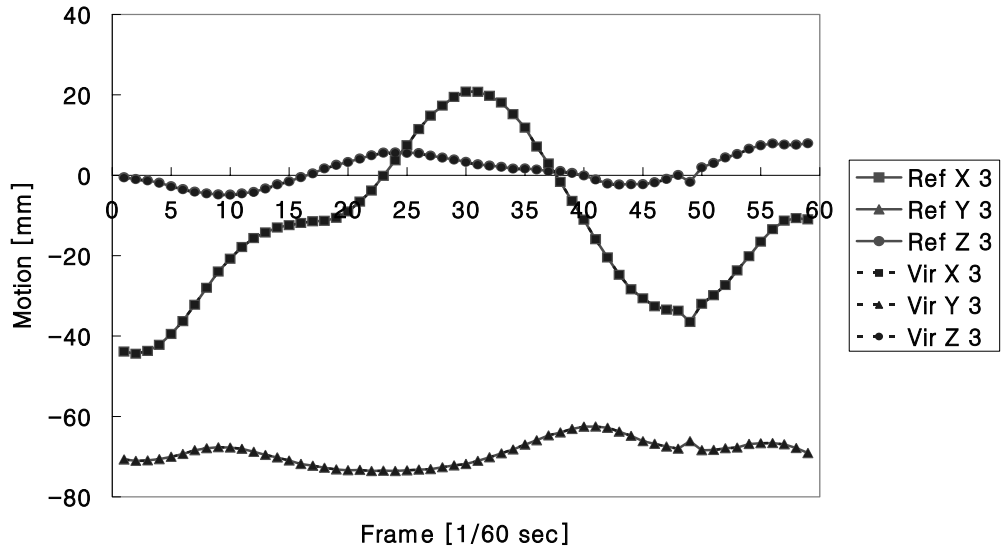
Fig. 3.42 Flow field images of the real camera and the virtual camera.



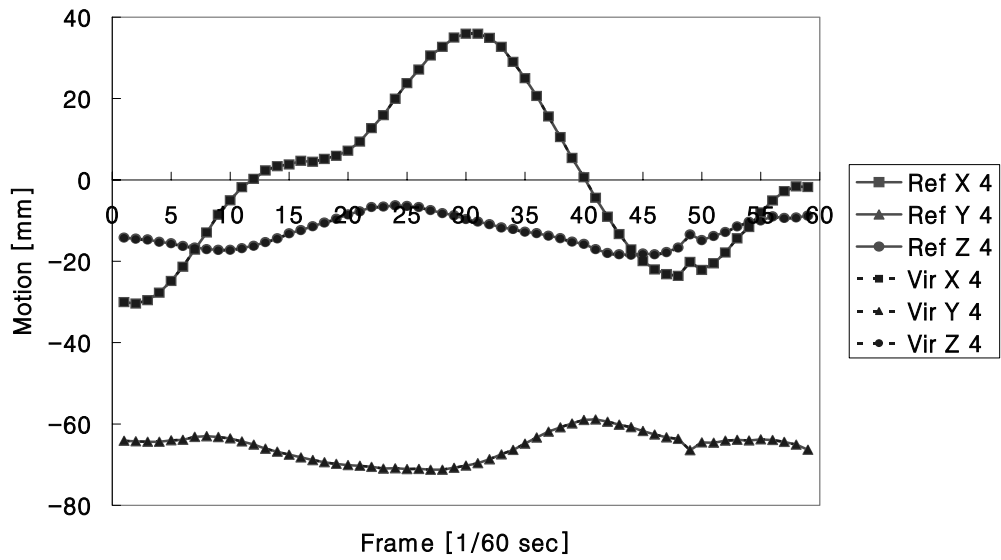
(a) Point 1



(b) Point 2



(c) Point 3



(d) Point 4

Fig. 3.43 Structure motion field results obtained in the cases of real and virtual images.

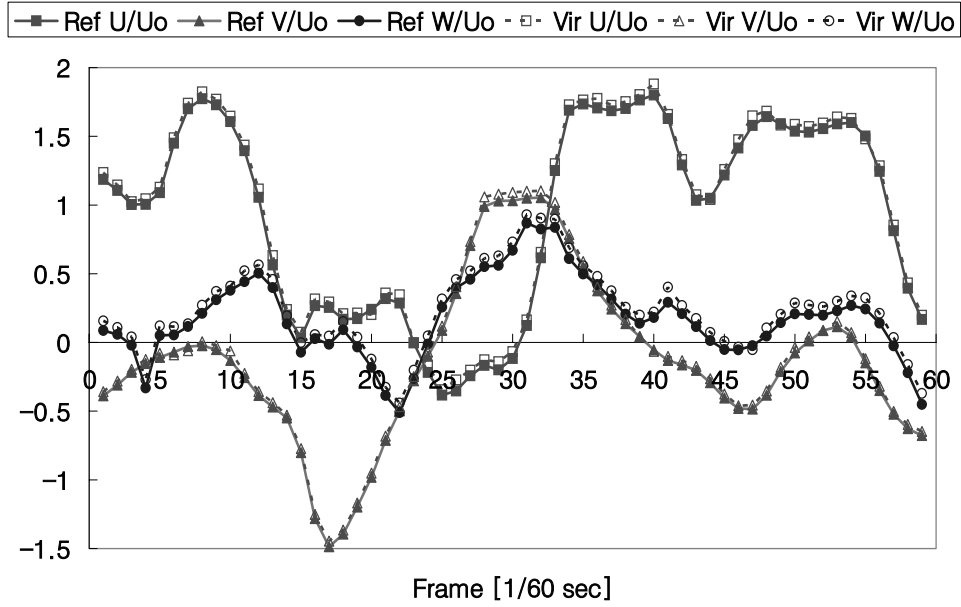


Fig. 3.44 Flow field results obtained in the cases of the real image and the virtual image.

Table 3.12 Uncertainty of FSIMS

Velocity fields	U velocity	Averaged Error	0.04
		Standard Deviation	0.0211
	V velocity	Averaged Error	0.03
		Standard Deviation	0.0168
	W velocity	Averaged Error	0.06
		Standard Deviation	0.0184
Motion fields	x displacement	Averaged Error	0.006
		Standard Deviation	0.0021
	y displacement	Averaged Error	-0.01
		Standard Deviation	0.0071
	z displacement	Averaged Error	-0.14
		Standard Deviation	0.0141

3.6 결과해석을 위한 오차 제거 및 물리량 해석법

3.6.1 오차 제거

먼저 유체의 연속성에 의해 전체 획득되어진 3차원 벡터 중 5%범위 내에서 오차제거를 수행하였으며, 2차로 Thompson's Tau 법을 사용하여 선행단계에서 미처 제거되지 않은 오차를 한 번 더 필터링하였다. 이 때 사용된 식은 아래와 같다.

$$\overline{X} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \text{ and } S^* = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \overline{X})^2}{N}}$$

N : 계측 횟수

X_i : 샘플

\overline{X} : 평균

S* : 표준편차

$\delta = |X_j - \overline{X}|$

해당 샘플과 평균값 차의 절대치를 δ 로 두고 톰슨타우를 위한 제거값표 (Rejection values for Thompson's Tau)에서 샘플 사이즈 N 과 중요도 (Level of Significance)에 적합한 P값을 선택한다. 본 논문에서 사용된 값은 샘플의 수는 구해지는 총 벡터의 개수이고, 중요도 값은 5%인 1.95996을 사

용하였다. 표에서 구한 값 τ 와 표준편차 S^* 를 곱한 후 δ 값 크거나 같은 면 X_j 를 제거하고, 그렇지 않으면 남겨둔다.

본 방법의 적용은 선행 획득된 3차원벡터들의 공간길이에 대한 총 평균을 이용하였으므로, 구 후류의 미소스케일의 벡터들은 제거되지 않는다. 이는 선행되어진 연속식에 의해서도 남겨진 벡터들 중 일부 타 값들과 비교해서 큰 값들을 제거하는데 유용하다고 사료된다. 이 때 사용된 중요도(Level of Significance) 5%는 신뢰성 95%를 벗어나는 값들을 제거하는 것이다. 샘플의 수와 중요도 레벨과의 관계를 Table 3.13을 참고하면 된다.

Table 3.13 Rejection values for THOMPSON'S TAU

Sample	Level of Significance			
Size N	P = 10%	5%	2%	1%
3	1.3968	1.4099	1.41352	1.414039
4	1.559	1.6080	1.6974	1.7147
5	1.611	1.757	1.869	1.9175
6	1.631	1.814	1.973	2.0509
7	1.640	1.848	2.040	2.142
8	1.644	1.870	2.087	2.207
9	1.647	1.885	2.121	2.256
10	1.648	1.895	2.146	2.294
11	1.648	1.904	2.166	2.324
12	1.649	1.910	2.183	2.348
13	1.649	1.915	2.196	2.368
14	1.649	1.919	2.207	2.385
15	1.649	1.923	2.216	2.399
16	1.649	1.926	2.224	2.411
17	1.649	1.928	2.231	2.422
18	1.649	1.931	2.237	2.432
19	1.649	1.932	2.342	2.440
20	1.649	1.934	2.247	2.447
21	1.649	1.936	2.251	2.454
22	1.649	1.937	2.255	2.460
23	1.649	1.938	2.259	2.465
24	1.649	1.940	2.262	2.470
25	1.649	1.941	2.264	2.475
26	1.648	1.942	2.267	2.479
27	1.648	1.942	2.269	2.483
28	1.648	1.943	2.272	2.487
29	1.648	1.944	2.274	2.490
30	1.648	1.944	2.275	2.493
31	1.648	1.945	2.277	2.495
32	1.648	1.945	2.279	2.498
∞	1.64485	1.95996	2.32634	2.57582

3.6.2 고유치 해석

유동장에서의 와유동 발생메커니즘 규명을 위하여 지금까지 많은 연구가 있어왔다. 1980년 중반 PIV 측정법이 개발되기 전까지는 열선유속계 혹은 레이저도플러 유속계 등과 같은 점계측에 의해 얻어진 시간연속의 속도정보로부터 조건부 채취(conditional sampling)법에 의하여 유동장의 와구조를 재구현함으로써 유동장의 와유동에 대한 위상학적 해석(topological analysis)에 기반을 둔 와구조 발생메커니즘에 대한 규명을 수행하여왔는데⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾, 이들 점계측에 의한 와구조 규명은 해석과정이 매우 까다롭거나 비정상(unsteady)적 거동구조 해석에는 원리상 불가능 하였다. 1995년에 Jeong과 Hussain⁽⁴¹⁾은 PIV측정데이터를 이용한 고유치해석법(일명 λ_2 법이라고도 함)을 구현함으로써 유동장의 와구조에 대한 비정상적 거동구조해석에 성공하였다.

PIV에 의하여 얻어진 단면 및 공간상에서의 속도벡터로부터 유동장의 와도분포(vorticity distribution)로부터 유동장의 와구조를 추출할 수도 있으나 와도분포는 전단층(shear layer)을 포함한 모든 미소 와(eddy)를 포함하는 관계로 유동장의 응집구조를 추출하는 데에는 민감도가 떨어지는 점으로부터 본 논문에서는 Jeong과 Hussain의 고유치해석법 적용에 의한 와구조의 시간거동을 파악하고자 하였다.

4D PTV로부터 얻어지는 순간의 3차원 속도벡터로부터 속도구배텐서($\bar{\nabla} \mathbf{u} = u_{i,j}$)로 구성되는 특성방정식은 식 (3.13)과 같이 표시될 수 있다.

$$\sigma^3 - P\sigma^2 + Q\sigma - R = 0 \quad (3.13)$$

$$P = u_{i,j}$$

$$Q = \frac{1}{2}(u_{i,j}^2 - u_{i,j}u_{j,i})$$

$$R = \text{Det}(u_{i,j})$$

Vortex core는 이 특성방정식의 고유치가 복소고유치를 가질 때 존재하게 되는데 이 방정식이 복소근을 가지기 위한 판별식인 다음 식 (3.14)가 양수일 때 Vortex core가 존재한다고 할 수 있다.

$$\Delta = \left(\frac{1}{3}Q\right)^3 + \left(\frac{1}{2}Q\right)^3 > 0 \quad (3.14)$$

이들 복소 물리량(복소 고유치)으로 정량적 평가가 어렵기 때문에 특성방정식을 아래의 식 (3.15)과 같은 대칭텐서와 비대칭텐서로 구성되는 새로운 텐서 $A_{i,j} = S_{i,j}S_{i,j} + R_{i,j}R_{i,j}$ (대칭텐서)로 전환함으로써 얻어지게 되는 실근을 평가함으로써 유동장의 와구조를 정량적으로 평가하고자 하였으며, 이 텐서의 두 번째 고유치(λ_2)를 구하여 contour를 그린다.

$$S_{i,j} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) : \text{대칭텐서} \quad (3.15)$$

$$R_{i,j} = \frac{1}{2} (u_{i,j} - u_{j,i}) : \text{비대칭 텐서}$$

Table 3.14은 새롭게 구성된 특성방정식의 실근의 고유치와 vortex core 간의 관계를 나타낸다.

고유치 해석은 다음과 같은 절차로써 3D PTV 혹은 4D PTV 기법에 적용하게 된다. 획득되어진 순시 3차원 벡터를 연속식에 의해서 1차 에러를 제거 한다. 아울러 톰슨법에 의해서 2차 에러를 제거한 후 가우시안 보간법을 사용하여 공간 내 속도벡터들을 그리드상에 표현한다. 고유치를 구하기 위해서는 격자상에서의 속도구배텐서가 필요하며, 이를 구하기 위해서 보간되어진 격자에 대해서 중심차분법을 적용하여 속도구배텐서를 구하였다. 속도구배텐서 $\nabla \vec{u} = u_{i,j}$ 는 아래의 식 (3.16)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{du}{dx} & \frac{du}{dy} & \frac{du}{dz} \\ \frac{dv}{dx} & \frac{dv}{dy} & \frac{dv}{dz} \\ \frac{dw}{dx} & \frac{dw}{dy} & \frac{dw}{dz} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

위의 속도구배텐서에 대하여 고유치를 구하기 위해서 파데브-레브리어의 알고리즘을 사용하여 람다에 대한 3차 방정식에 대한 계수 및 Bairstow법⁽⁴²⁾에 의하여 3차 방정식에 대한 해를 구하였다. 이 때 람다값은 위에서 설명한 바와 같이 허수를 가지는 경우가 존재하므로, 속도구배텐서를 대칭과 비대칭행렬로 변형시킨 후, 위에 제시된 방법에 의하여 새로운 텐서

$A_{i,j} = S_{i,j}S_{i,j} + R_{i,j}R_{i,j}$ 를 생성하여 고유치를 해석하면 허수가 아닌 실수를 가지게 된다. 구해진 람다값 중 크기가 2번째인 값이 해당 격자에서의 고유치가 되며, 이 때 크기가 - 인 고유치가 Vortex Core가 된다.

Table 3.14 Relations between vortex core and λ_2 .

λ_1	λ_2	λ_3	$\sum \lambda_i$	Negative λ_2
+	-	-	-	Vortex Core
+	-	-	+	Vortex Core
+	+	-	-	Not Vortex Core
+	+	+	+	Not Vortex Core

또한 획득된 3차원 벡터들을 단면으로 나누어 해당 단면에 대한 고유치를 해석함으로써 해서 해당위치에서의 마디점, 안장점, 중심, 나선점들을 찾을 수 있으며 해당 위치에 대한 안정성 유무를 판별할 수 있다.

고유치 해석을 위해서 3차원 공간벡터를 2차원 단면으로 나누며(일반적으로 고유치 해석은 선형으로 구해진 3차원 공간상의 정보를 2차원 단면으로 변환시킨 후 이를 통하여 단면에 대한 유동의 특성을 살펴보는데 사용하고 있음), 이 때 사용된 식은 아래와 같다. 식은 xy평면에 적용되는 식으로 이하(yz평면, xz평면)는 동일한 과정을 거치면 된다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$a_{11} = -\frac{\partial u}{\partial x}, a_{12} = -\frac{\partial u}{\partial y}, a_{21} = -\frac{\partial v}{\partial x}, a_{22} = -\frac{\partial v}{\partial y}$$

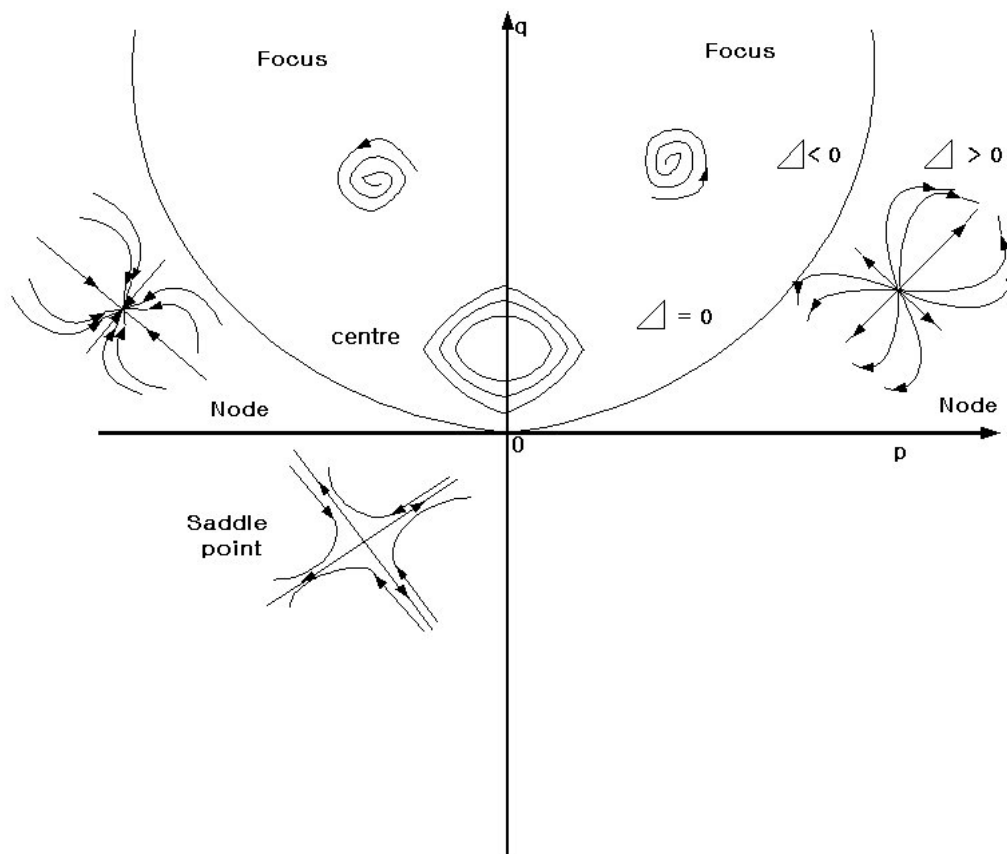
여기서, 편미분값들은 획득된 속도벡터를 이용하여 구한다.

식 (3.17)에 대한 고유치해석을 수행하면 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} |A - \lambda I| &= 0 \\ \lambda^2 - p\lambda + q &= 0 \\ q = \det A &= a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \\ p = \text{tr} A &= a_{11} + a_{22} \\ \Delta &= p^2 - 4q \end{aligned} \tag{3.18}$$

여기서, 값이 다른 실수 고유값들을 가질 때, 고유값이 모두 음인 경우 $\Delta > 0$ 이고 $p < 0$ 또는 $q > 0$ 이면, 안정 마디점(Stable Node)이고 고유값이 모두 양인 경우 $\Delta > 0$ 이고 $p > 0$ 또는 $q > 0$ 이면, 불안정 마디점(Unstable Node) 이다. 고유값이 반대부호인 경우는 $\Delta > 0$ 이고 $q < 0$ 일 때 안장점(Saddle Point)을 가진다. 고유값이 중근을 가질 때는 $\Delta = 0$ 인 경우로 1차 독립인 두 고유벡터 또는 1차 독립인 하나의 고유벡터를 가지며, 이 때 각각 퇴화 안정 마디점이나 퇴화 불안정 마디점을 가진다. 복소 고유값을 가질 때는 순허수의 근인 경우 $\Delta < 0$ 이고 $p = 0$ 이면 중심(Centre)이고 0이 아닌 실수부의 경우 $\Delta < 0$ 이고 $p \neq 0$ 이면 나선점(Focus)이다. Fig. 3.45에 고유치의 특성을 그래프로 나타나 있는데 I사분면, III사분면, IV사분면에서는 불안정

본 논문에서는 안정점(Saddle Point : S), 나선점(Focus : F), 마디점(Node : N)을 편의상 S, F, N으로 표기하였다.



– 115 –

제 4 장 구 후류 유동장 해석

4.1 연구배경

구의 주위유동은 일상생활에서 흔하게 볼 수 있으면서 이 유동에 대한 방대한 연구보고는 거의가 수치계산에 의한 것이며 실험적 연구 성과는 소수에 지나지 않는다. Ploumhans 등⁽⁴³⁾은 Re수가 100, 300 및 500일 때의 구의 후류를 3D Vortex Method에 의거한 DNS로 해석하였으며, Gushchinf 등⁽⁴⁴⁾은 구 주위의 와의 박리현상을 DNS에 의해 구현하였다. Miyazaki 등⁽⁴⁵⁾은 와(Vortex) 확산방정식을 이용하여 구의 유동장 해석을 시도하였고, Carlos 등⁽⁴⁶⁾은 계층구조를 지닌 구의 유동장에 있어서 와의 구조가 수직으로 운동함을 수치해석으로 보였다. Arai⁽⁴⁷⁾는 구의 고속유동에 대한 Stoke's 해를 구하였으며, Tomboulides 등⁽⁴⁸⁾은 고속 구의 후류와 난류로의 천이에 대한 연구를 수치해석으로 수행하였다. Kurose 등⁽⁴⁹⁾은 선형전단유동내의 회전하는 구의 양력과 항력을 계산하였다.

Sakamoto 등⁽⁵⁰⁾은 균일한 전단 유동 내에서 구로부터의 와의 Shedding 주파수와 발생메커니즘 규명을 위한 실험을 수행하였다. 그의 실험은 Re 200에서 3000에 이르는 범위에서 이루어졌으나, 2차원 해석이라는 공간상의 제약이 있었다. Johnson 등⁽⁵¹⁾은 Re 300일 때의 구의 후류 유동장에 대한 실험과 수치해석을 병행하였다. 그는 또한 구의 후류의 유동형태를 수치해석과 염료에 의한 정성적 가시화실험으로 보였다.

지금까지 여러 연구자들에 의하면, 구 후류의 와 구조는 구의 외부유동에 의하여 간히게 되며 내부 와 구조는 상하좌우로 교번으로 진동함이 알려져 있다. 특히, 이러한 유동특성으로 인하여 실험계측에 많은 어려움이 따랐음을 알 수 있다. 이런 연유로 대부분의 연구자들에 의한 성과는 컴퓨터에 의한 수치해석에 의한 결과로서 실험결과와는 비교 검토가 완전히 이루어지지 않은 상태다. 몇몇 연구자들에 의해서 구의 유동특성을 해석하기 위해서 실험이 진행되어지고 있는 실정이나, 구의 유동자체가 3차원 복잡 유동이라는 점으로부터 2차원적인 측정실험결과 혹은 3차원적인 정성적인 가시화실험에 그치는 경우가 많았다.

그러나 최근 개발된 3D PTV 계측법⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾에 의하면 복잡 유동에 대한 정량적 해석이 가능하게 되었으며, 황⁽¹⁶⁾과 Doh 등⁽¹⁷⁾은 구의 후류 해석에 있어서 3차원실험 및 해석을 위해 3D PTV에 의한 구의 후류 유동장 해석을 성공적으로 수행하였다. 하지만 이들에서의 연구는 시간과 공간에 대한 제약이 있었다. 즉, 시간에 불연속적인 데이터를 획득함으로써 순시의 3차원 속도성분에 의한 유동특성 파악 및 양상불평균에 의한 평균유동장의 물리적 특성해석은 가능하였으나, 시간 연속적인 물리량의 해석에는 한계가 있었다. 또한 저해상도의 카메라를 사용함으로써 공간분해능에도 한계를 갖고 있었다. 즉 이를 통해 구 후류의 구조가 2중구조로 되어있음을 밝혔으나, 사용된 카메라대비 측정영역의 공간해상도가 낮았던 관계로 대규모크기의 유동구조 거동만이 파악되었을 뿐 보다 상세한 거동예측에는 한계를 지니고 있었다.

이론상 3D PTV측정법으로 유동의 상세구조를 측정하기 위해서는 동일 크기의 측정영역에 대하여 고해상의 카메라만을 대치시키면 되지만 방대한

계산시간이 요하게 되는 문제점과 고해상으로 인한 입자밀도가 증가한 만큼 3D PTV측정결과에 오류백터가 급증함으로써 상세한 와구조 보다는 대규모 와구제 해석에만 국한되었다. 즉, Doh 등⁽¹⁷⁾은 3D PTV측정으로 구의 후류에 이중와구조가 있음을 확인하였으나 측정시스템의 하드웨어해상도와 이에 따른 계산알고리즘 적용의 제약으로 대규모 와구조 해석에 국한하고 있었다. 3D PTV측정법의 이와 같은 제약점을 극복하기 위하여 상용화 된 측정법이 SPIV측정법⁽⁵²⁾이다. 이 시스템에서는 레이저 평면광으로 조명된 유동 단면에서의 3가지 속도성분을 측정하게 되는데, 일반적으로 out-of-plane의 속도성분은 바로 측정되어지지 않고 두 대의 카메라로 측정한 평면 데이터로부터 도출하게 된다. 도 등⁽⁷⁾은 Angular법의 장점을 살리고 유동계측의 제약을 주었던 카메라의 배치에 자유성을 부여할 수 있도록 영상의 기하학적 변환(geometric transformation)을 통하여 굴절과 수차의 영향을 고려함으로써 Translation법과 Angular법의 단점을 극복한 SPIV법을 제시하였다. 그러나 PIV는 원리상 얻어지는 속도백터가 격자상에서 얻어지는 결과이므로 격자보다 작은 유동속도성분을 측정하기란 쉽지가 않다.

한편, PIV⁽¹⁾는 유동장에 투입된 개별입자들의 중심을 추적한 결과로부터 속도장을 얻어내는 관계로 원리상 유동의 난동성분 혹은 상기의 PIV계산에 필요한 격자보다 작은 크기의 유동속도성분을 측정해 낼 수 있는 장점을 지니고 있다. 도 등⁽⁷⁾은 SPIV의 장점과 PTV의 장점을 살려 SPTV측정법을 개발하였다.

본장에서는 기존의 3D PTV법이 가지고 있던 계산상의 오류백터발생을 억제하고 계산시간을 저감시킬 수 있는 고속 고해상 카메라 적용의 ‘측정

영역 다분할 3D PTV (multi-sectioned 3D PTV) 알고리즘', 이른바 4D PTV 측정법, 을 구축한 다음 이를 구의 후류유동장 측정에 적용함으로써 실험데이터베이스를 구축하고자 한다. 또한, 구축된 실험결과와의 정량적 정성적 비교검토를 위하여 SPIV법⁽⁷⁾과 SPTV법⁽¹⁰⁾을 적용하여 구 후류 유동장에 대한 측정해석을 수행함과 동시에 측정법의 복잡 유동장 측정 적용에 발생하는 제반사항에 관하여 정리하고자 하는 것을 연구의 목적으로 삼고 있다.

4.2 실험방법 및 절차

2대의 고해상 고속도 카메라를 사용하였으며, 4D PTV와 SPIV/SPTV 기법을 사용하여 구 후류를 유동장을 측정하였다.

본 실험에서는 $300 \times 300 \times 1200 \text{ mm}^3$ 인 회류 수조를 사용하였으며, 지름 30mm인 아크릴구에 광원의 산란 및 굴절을 피하기 위해 무광흑색도료를 도포하였다. 구의 위치는 회류수조의 출구에서 375mm 후방의 수조바닥에서 100mm의 높이에 설치하였고 입구에는 Honeycomb을 설치하여 일량류가 되도록 하였다. 입구로부터의 평균유속은 0.03711 m/s 이며, 물의 동점성계수 ν 는 1.0×10^{-6} 이며 이 때의 레이놀즈수 Re 는 약 1113이었다.

Fig. 4.1 과 Fig. 4.2는 실제 실험에 앞서서 수조의 입구에서의 물의 흐름이 일량류를 유지하는지와 입구조건에서의 난류강도가 어느 정도인지 확인하기 위해서 평균유속분포와 난류강도를 그래프로 나타낸 것으로, 입구에서의 평균유속분포를 살펴보면, U/U_0 성분이 다소 안정적이지 못한 경향을 보

인다. 이는 계속된 반복 실험에 의한 수조내의 임펠러의 손상과 수조의 노후에 따른 영향으로 사료된다.

또한 입구에서의 난류강도 TIU 및 TIV 역시 다소 안정적이지는 못하나, 최대 0.2%이내에서 유지되고 있음을 확인하였다.

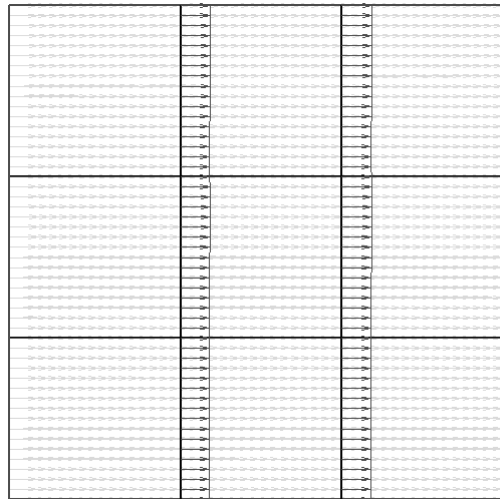
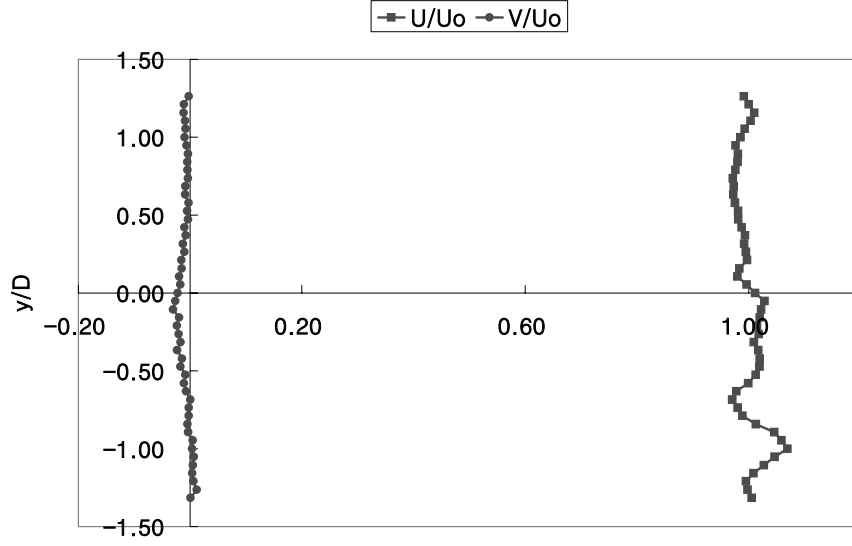
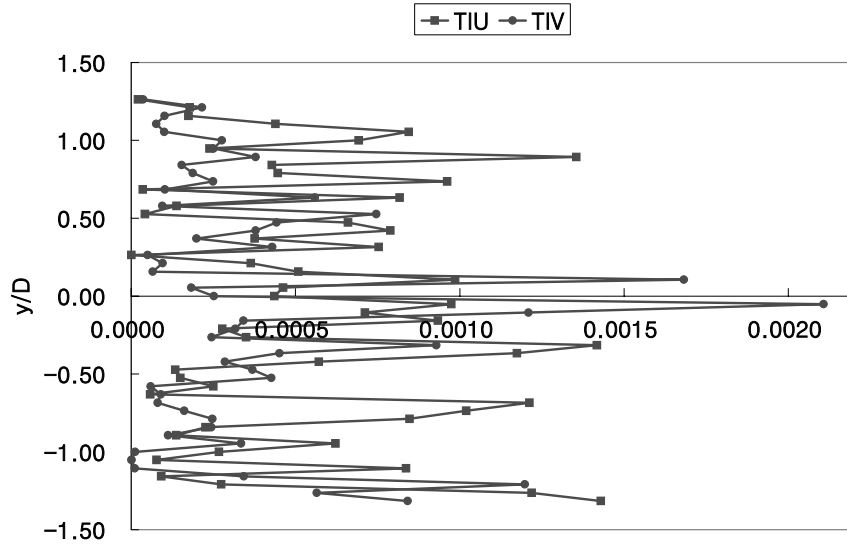


Fig. 4.1 Mean velocity profile of inlet.



(a) Mean velocity profile of dimensionless parameter



(b) Turbulence intensity of each u, v component

$$\left(T_u = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_0}, T_v = \frac{\sqrt{v'^2}}{U_0} \right)$$

Fig. 4.2 Inlet condition at the circular water tank.

Fig. 4.3은 4D PTV를 위한 실험장치도를 나타낸 것으로, 광원으로 70kHz로 작동되어지는 전자안정기를 설치한 400W 메탈 할로겐램프를 사용하여, 최대 500Hz로 작동하는 카메라에 의한 영상의 흔들 현상이 생기지 않도록 하였다. 또한 구 중심으로부터 565mm($x/D=18.8$) 떨어진 곳에 45도 경사의 스텐레스 재질의 거울의 중심이 오도록 설치하여 광원을 계측영역까지 조사하도록 하였다. 구 중심으로부터 $x/D=18.8$ 떨어져 설치된 거울에 의한 구 후류의 영향은 거의 미치지 않음을 2차원 단면에서의 속도분포 및 유선으로부터 확인하였다.

Fig. 4.4와 Fig. 4.5는 SPIV/SPTV를 위한 실험장치도를 나타낸 것으로, 전자와 후자는 각각 xy 면과 yz 면에 대한 구 후류에 대해서 측정한 것이다. 이 때 사용된 광원으로는 Ar-ion 레이저가 사용되었으며, 이는 4D PTV에 사용된 메탈 할로겐램프의 경우 체적에 대한 광원으로 단면광으로 만들었을 때 광원의 집중도가 낮아서 레이저에 비해 상대적으로 어두워졌기 때문이다. 아울러, yz 면에서의 구 후류를 측정하기 위해서는 카메라를 물속에 투입하여야 하나, 이는 현실적으로 불가능함으로, 상기 기술된 바와 같이 구 중심으로부터 $x/D=18.8$ 떨어진 곳에 거울의 중심이 오도록 설치한 후, 거울에 반사된 영상을 거울에 수직으로 설치되어 있는 2대의 고해상도 고속도 카메라로 획득하였다.

Fig. 4.6과 Fig. 4.7은 4D PTV에 대한 교정과정 및 실험장면과 2대의 카메라에서 획득한 교정기의 영상을 나타낸 것으로, 계측영역은 구 중심을 원점으로 하여, x , y 및 z 축으로 각각 15mm~135mm, -48mm~48mm, -48mm~48mm으로 하였다.

Fig. 4.8과 Fig. 4.9는 xy면에서의 SPIV/SPTV에 대한 교정과정 및 실험 장면과 2대의 카메라에서 획득한 교정기의 영상을 나타낸 것으로, xy평면 교정기를 z축방향으로 4mm씩 -24mm~24mm까지 총 13회 이동시켜 공간을 인식시켰다. 전체 공간인식은 구 중심을 원점으로 15mm~115mm, -40mm~40mm, -24mm~24mm로 하였다.

Fig. 4.10과 Fig. 4.11는 yz면에서의 SPIV/SPTV에 대한 교정과정 및 실험 장면과 2대의 카메라에서 획득한 교정기의 영상을 나타낸 것으로, yz평면 교정기를 x축방향으로 4mm씩 -24mm~24mm까지 총 13회 이동시켜 공간을 인식시켰다. 전체 공간인식은 구 중심을 원점으로 -24mm~24mm, -35mm~35mm, -35mm~35mm로 하였다.

모든 실험에 있어 공통적으로 사용된 장비인 2대의 고해상 고속도 카메라(Photron, 1280×1024pixels, Maximum 500 frame/sec)는 서로 동기화시켜 사용하였으며, 실제 실험에서는 광원의 제약으로 1280×1024pixels, 60 frame/s로 실험을 수행하였다.

또한 PIV/PTV에 있어 유동에 영향이나 방해를 주지 않고 정확하게 추적할 수 있는 입자가 사용되어지는데, 본 실험에서는 비중 1.02, 입자직경 150 μ m인 나일론 12를 입자로 사용하였다.

저장된 영상은 배경영상을 제거하면 순수 입자들만이 존재하게 된다. 이렇게 처리된 영상은 임계값에 의한 이치화(binarization) 후, 윤곽선추적(boundary trace)을 행하여 하나의 입자로 인식되는 화소에 대해 식 (4.1)과 같은 면적모멘트법에 의해 입자의 중심을 결정한다.

결정된 입자의 중심으로부터 수행된 카메라의 교정작업 결과를 이용하여

유전 알고리즘을 적용하여 최종적인 3차원 벡터를 결정한다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4.1)$$

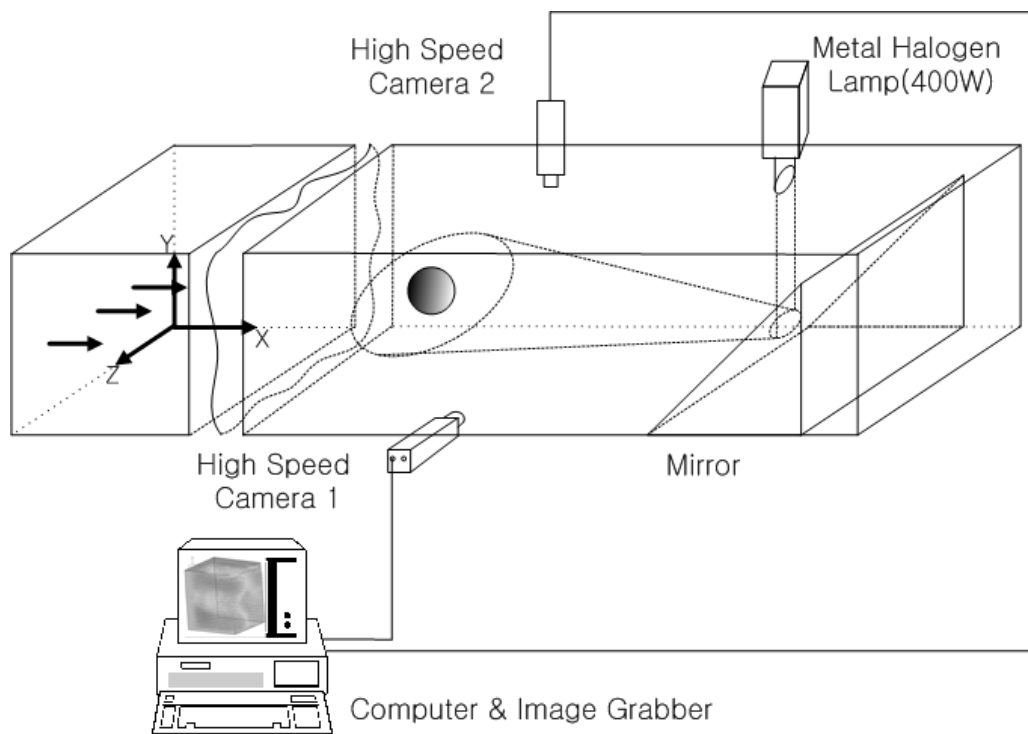


Fig. 4.3 Schema of 4D PTV system.

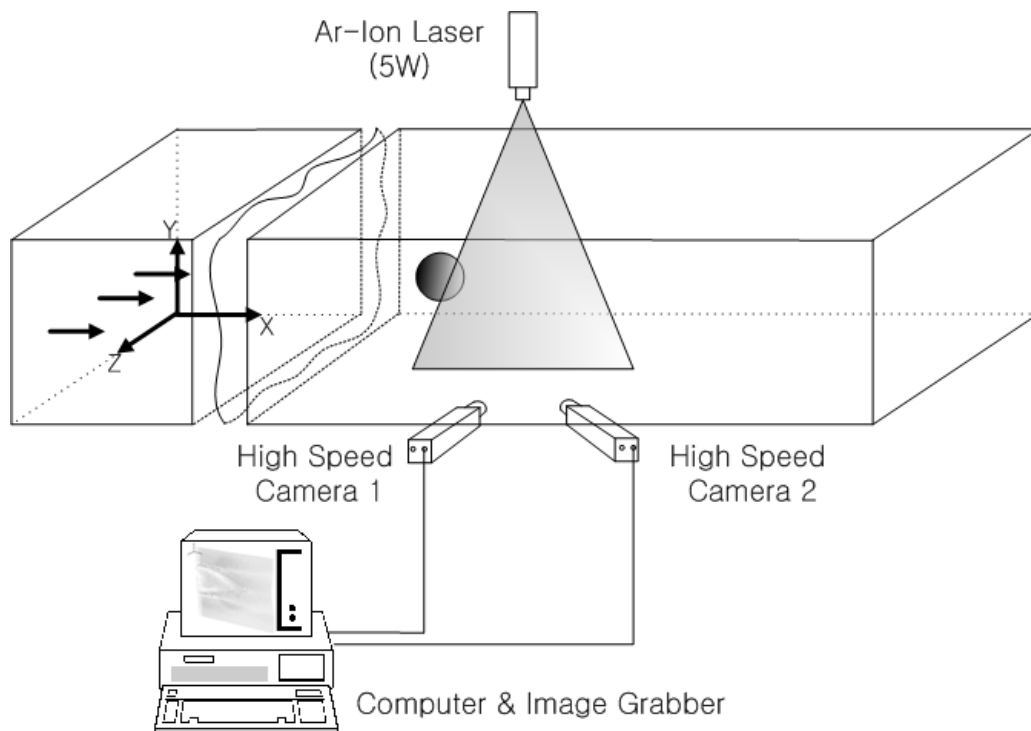


Fig. 4.4 Schema of SPIV/SPTV at xy plane.

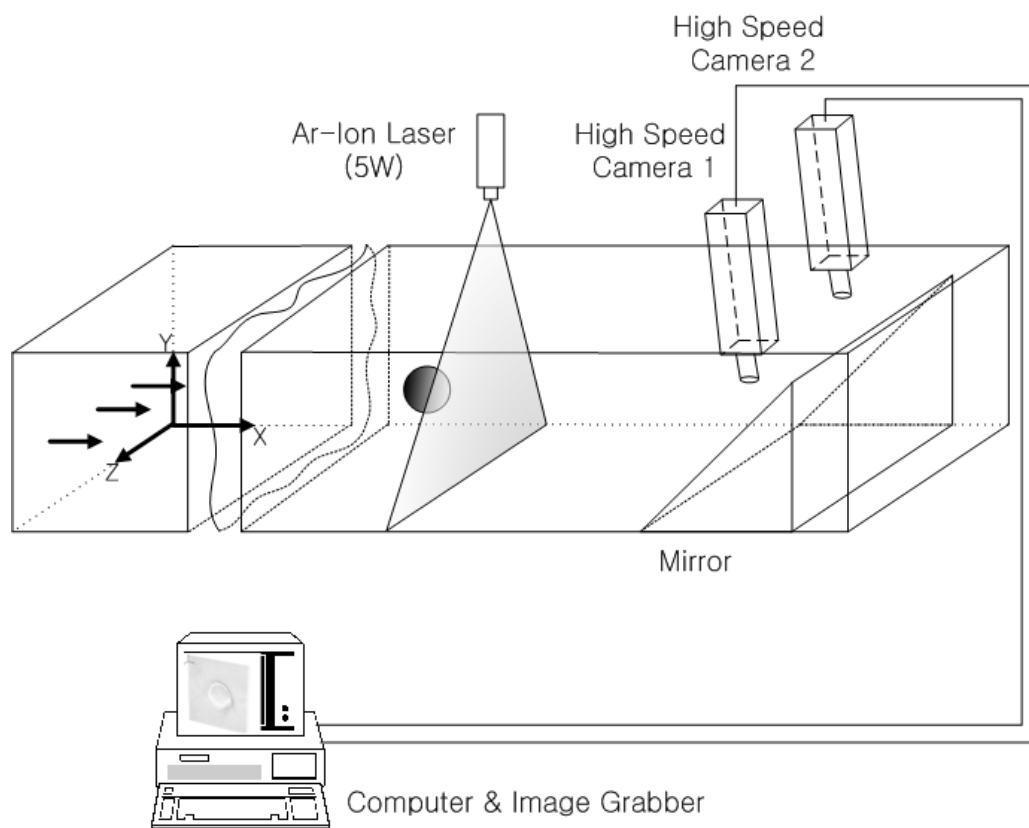
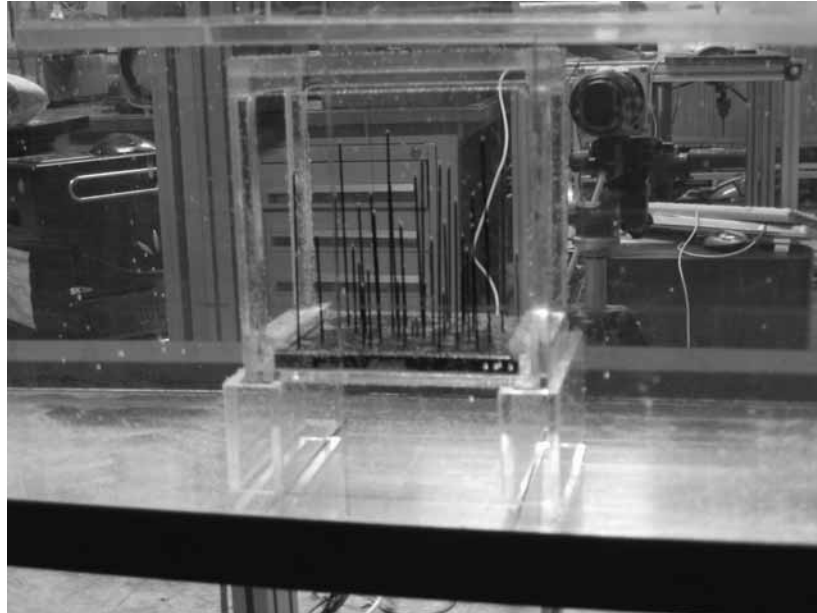
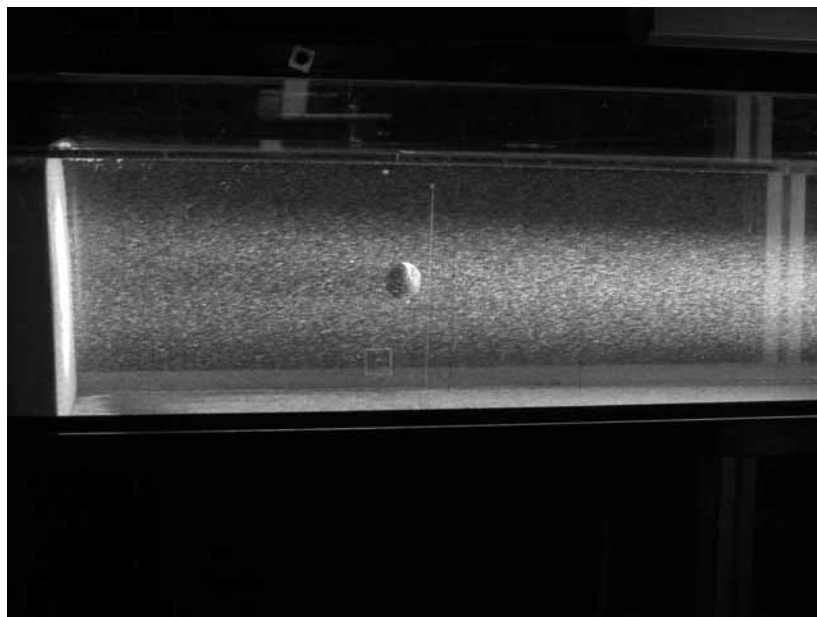


Fig. 4.5 Schema of SPIV/SPTV at yz plane.



(a) Calibration process for 4D PTV

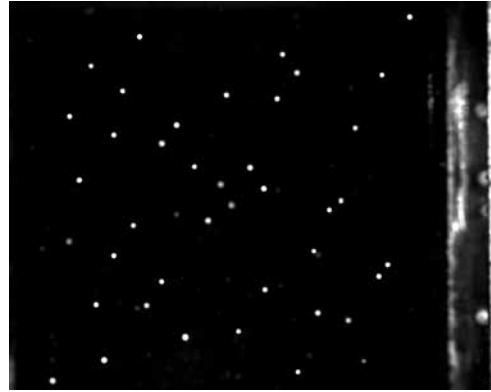


(b) Experimental image for 4D PTV

Fig. 4.6 4D PTV System.

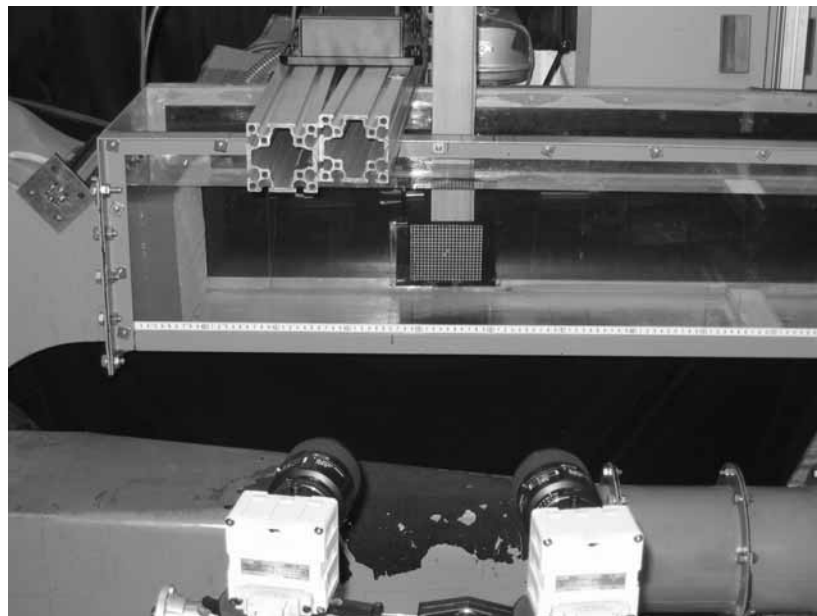


(a) View of camera 1



(b) View of camera 2

Fig. 4.7 Calibrator image for 4D PTV.

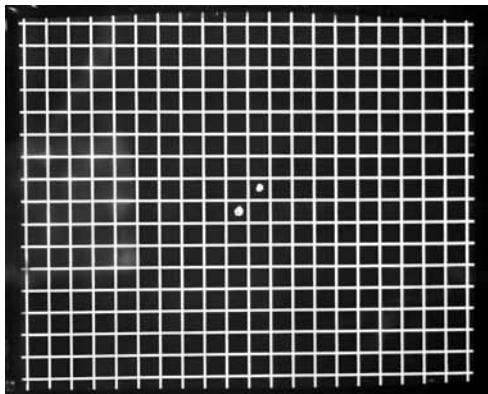


(a) Calibration process for SPIV/SPTV at xy plane

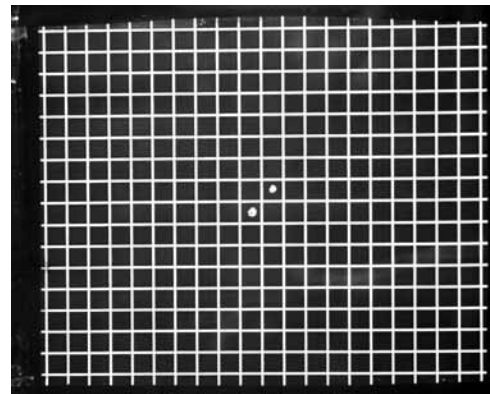


(b) Experiment image for SPIV/SPTV at xy plane

Fig. 4.8 SPIV/SPTV system at xy plane.

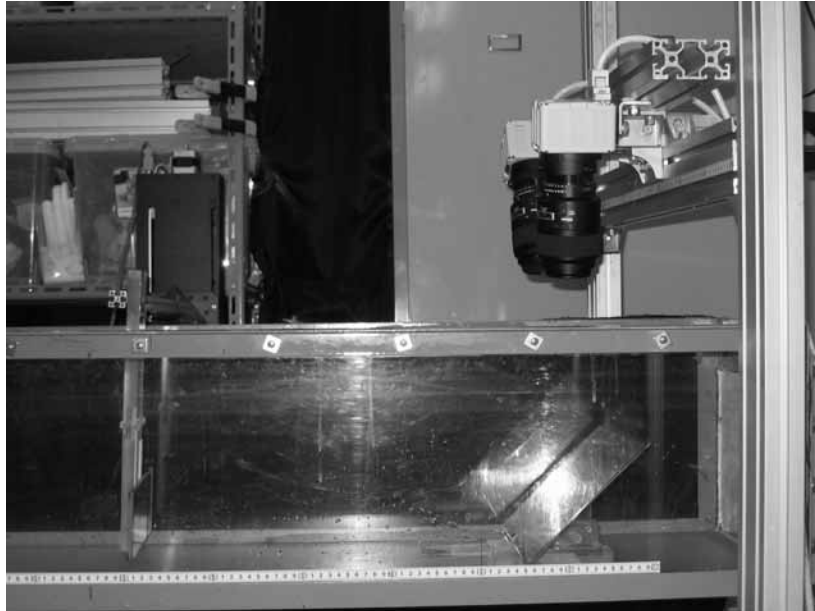


(a) View of camera 1

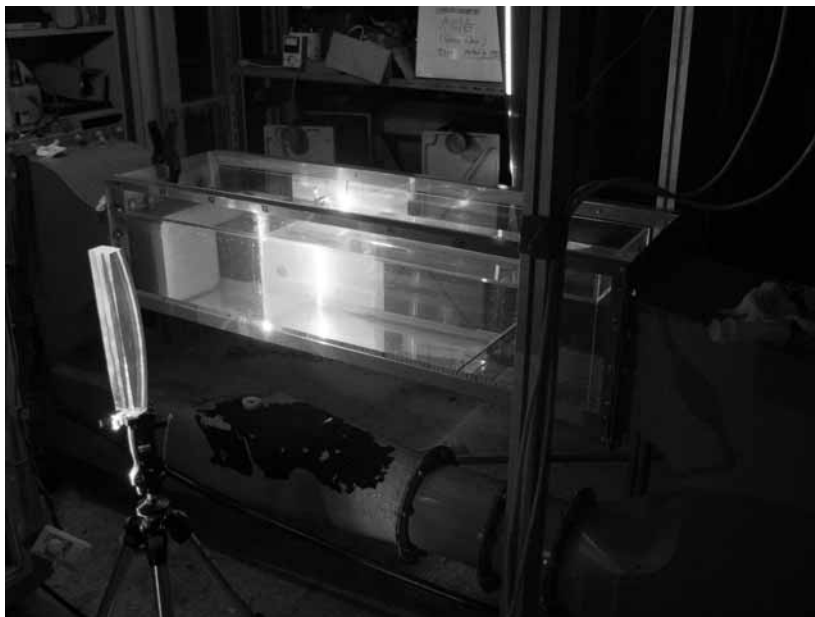


(b) View of camera 2

Fig. 4.9 Calibrator image for SPIV/SPTV at xy plane.

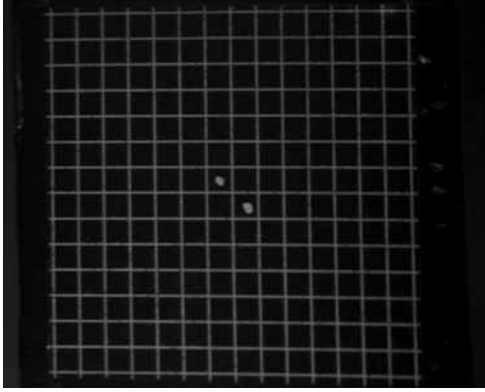


(a) Calibration process for SPIV/SPTV at yz plane

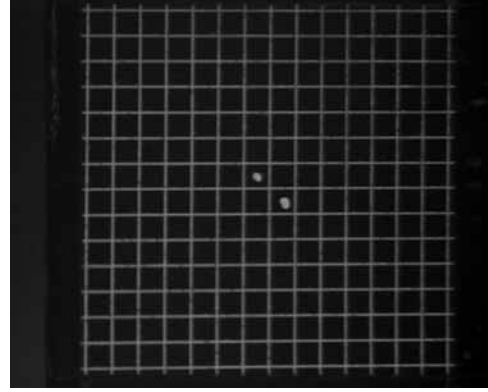


(b) Experimental image for SPIV/SPTV at yz plane

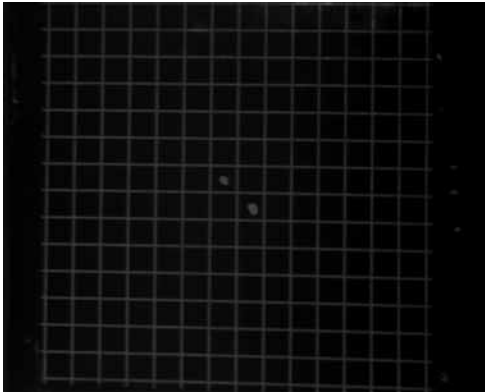
Fig. 4.10 SPIV/SPTV system at yz plane.



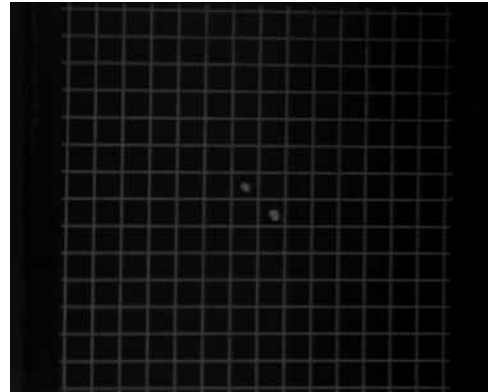
(a) View of camera 1 at $x/D = 1.0$



(b) View of camera 2 at $x/D = 1.0$



(a) View of camera 1 at $x/D = 2.5$

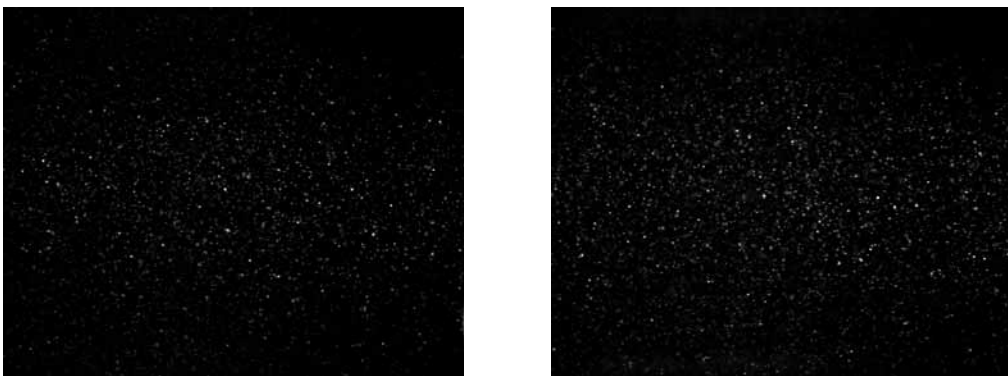


(b) View of camera 2 at $x/D = 2.5$

Fig. 4.11 Calibrator image for SPIV/SPTV at yz plane.

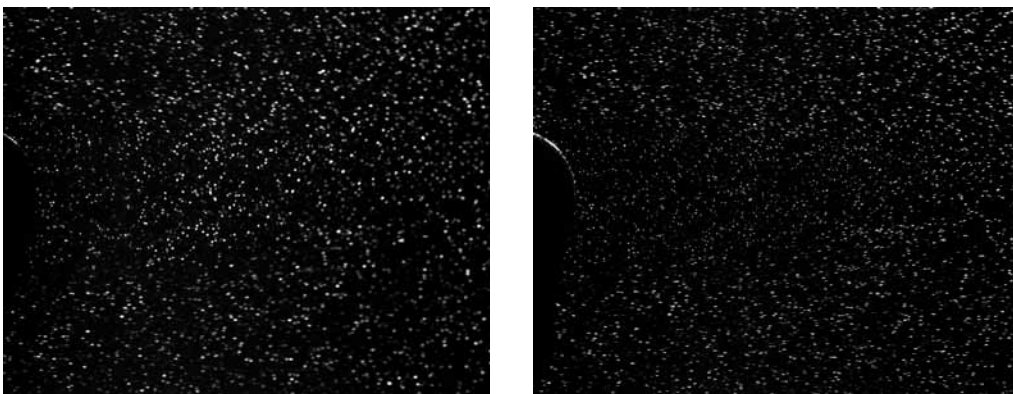
4. 3 실험결과

Fig. 4.12는 4D PTV를 위해 구 후류의 순시 영상을 각각의 카메라에서 획득한 영상이며, Fig. 4.13은 SPIV/SPTV를 위해 해당 단면에서 각각의 카메라에 획득된 실험영상을 나타낸 것이다.



(a) Instantaneous image of camera1 (b) Instantaneous image of camera2

Fig. 4.12 Instantaneous image of each cameras. (4D PTV)



(a) Camera 1 at the xy section

(b) Camera 2 at the xy section



(c) Camera 1 at the $x/D=1.0$ of yz section



(d) Camera 2 at the $x/D=1.0$ of yz section



(e) Camera 1 at the $x/D=2.5$ of yz section



(f) Camera 2 at the $x/D=2.5$ of yz section

Fig. 4.13 Instantaneous image of each cameras and each section.
(SPIV/SPTV)

4.3.1 4D PTV 측정 결과

이 영상을 이용하여 계측결과들은 구의 중심좌표를 원점으로 하여 Fig. 4.14와 같은 좌표계를 이용하여 선처리 및 후처리를 하면 된다.

Fig. 4.15 (a)는 한번의 계측으로 순간적으로 얻어지는 벡터장을 나타내는데 한 순간에 얻어지는 개수는 4000개 전후였다. 이 순간의 속도벡터장으로부터 오류벡터를 제거한 뒤 공간의 격자상으로 보간하였다. 오류벡터를 제외한 속도벡터의 개수는 3000개 전후였다. Fig. 4.15 (b)는 순간속도벡터장을 격자상(16 x 13 x 13)으로 가우스보간법⁽¹⁵⁾으로 보간한 결과를 나타낸다. 모든 물리적 고찰 및 평가는 이 격자상의 속도벡터장으로 수행하였다.

Fig. 4.16의 (a)부터 (f)까지는 측정개시 시점으로부터 임의의 시각까지 구후류유동 구조의 변화를 공간의 와도분포로 분석한 결과를 보이고 있다. 각 속도벡터장은 1/60초 간격으로 총 1024시각 분에 대하여 얻은 결과인데 물리적 변화시간 스케일보다 작은 간격이어서 유동구조의 시간적 이력변화를 관찰할 수 있었다.

그림 (a)는 측정초기에서의 속도장을 나타내고 있는데 구위 바로 뒤쪽에 Corn형상의 와구조가 있음을 알 수 있다. (b)에서는 이 C-shape는 길게 늘어나게 된다. (c)에서는 목부위가 가늘어지게 된다. (d)에서는 C-shape이 S형으로 꼬임과 동시에 외부유동의 영향으로 바깥으로 빠져나가려 하고 있다. (e)에서는 S형으로 꼬였던 와구조가 재차 C-shape로 복귀하게 된다. (f)에서는 C-shape로 되었던 구조가 목부위 근처 뿌리로부터 분리되고 있다. 이와 같은 현상은 규칙적으로 반복되고 있음이 가시화영상으로부터 확인되

었다.

Fig. 4.17은 Fig. 4.16에서 1/1024, 4/1024, 17/1024 와 35/1024의 시간에 해당하는 와도분포(vorticity distribution) 단면을 나타낸 것이다. 단면을 살펴볼 경우 역시 4/1024에서 와도분포의 목부위가 가늘어지며, 17/1024에서 와도분포가 S자형태로 됨을 확인할 수 있다. 아울러 35/1024에서 가늘어진 목부위의 와가 떨어져나감을 확인하였다. 또한 두개의 와구조가 유동방향으로 길게 늘어져 나감을 확인할 수 있으며, 이는 구의 유동중 내부셀 유동에 해당하는 것으로 좀더 유동방향으로 흘러감에 따라 헤어핀(hair pin) 구조를 지니게 된다.

Fig. 4.18은 yz 단면에서의 무차원 속도분포를 나타낸 것으로, 구의 후류에 해당하는 곳이다. 구 후면의 경우 박리에 의한 부압영역이 존재하게 되어 유속이 진행방향과 반대되는 흐름을 구 후면에서 지남을 확인할 수 있다. Fig. 4.19은 이 때의 yz 단면에서의 x/D의 위치에 따른 무차원 속도프로파일을 나타내고 있다. 역시 구 후면에 부압에 의한 유속의 흐름이 반대됨을 확인할 수 있다.

Fig. 4.20은 황의 석사논문⁽¹⁶⁾의 결과 중 일부로써 저해상도 카메라를 이용한 3D PTV의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4.19과 유사한 경향을 보이나 후부에 무차원 속도상 다소의 차이가 존재한다. 이는 실험에 사용된 광원의 영향이 가장 크다. 즉 4D PTV의 경우 실험 공간을 충분히 밝게 조명하여 주어야 하나, 광원의 부재로 실험부에 충분한 광원이 조명되지 못함으로써, 구후면의 입자들의 정확하게 추종하기 난해함에 기인된 오차로 사료된다.

Fig. 4.21은 S형태의 끝점에 해당하는 샘플링 포인트 $x/D=2.90$,

$y/D=0.77$, $z/D=-0.03$ 를 표시한 것이며, Fig. 4.23의 (a) 와 (b)에서 이 점에서의 무차원 속도변화를 시간추이별로 추출하여 그래프로 나타내었다. (a)는 전체 실험 시간에 대한 시간추이 결과이며, (b)는 200 프레임까지의 결과를 나타낸 것이다. (b)상의 타원 세 개는 좌측부터 17/1024에 해당하는 S형태의 와도분포 구조를 보이는 지점이며, 중앙은 35/1024에 해당하는 곳으로 목 부분의 와구조가 떨어져 나가는 지점이다. (b)에서의 오른쪽 큰 타원은 새로운 Fig. 4.22에 나타나 있는 바와 같이 S형태의 와구조가 생성되는 시각을 나타낸다. 위의 그림들로부터 구의 후면에서의 유동은 특정 주기를 가지고 있음을 추론할 수 있다.

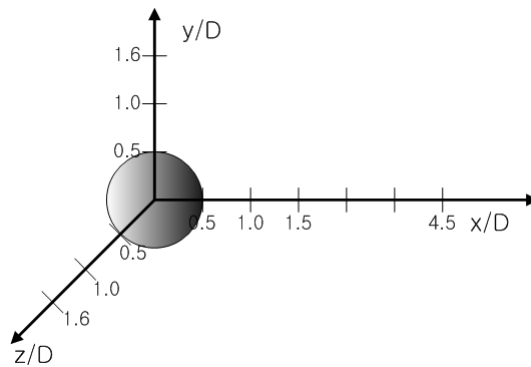
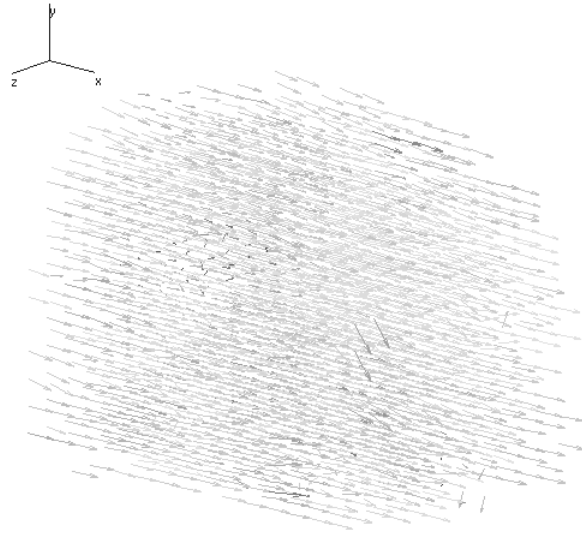
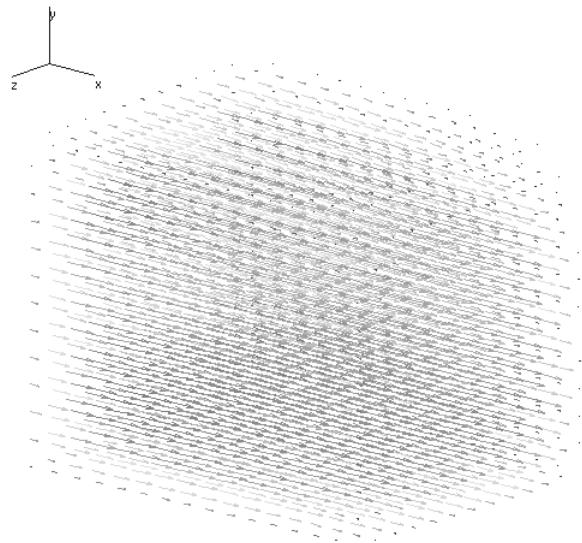


Fig. 4.14 Measurement coordinate.

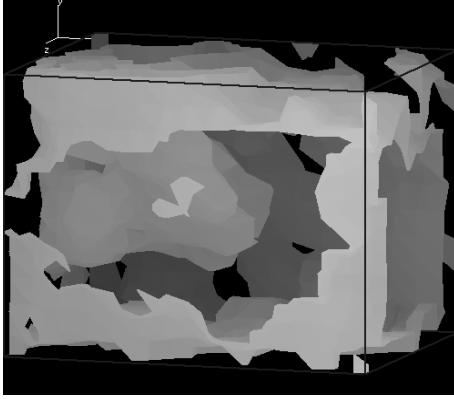


(a) Instantaneous velocity distribution.

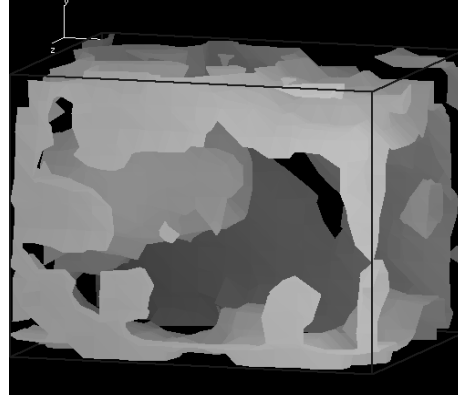


(b) Mean velocity distribution.

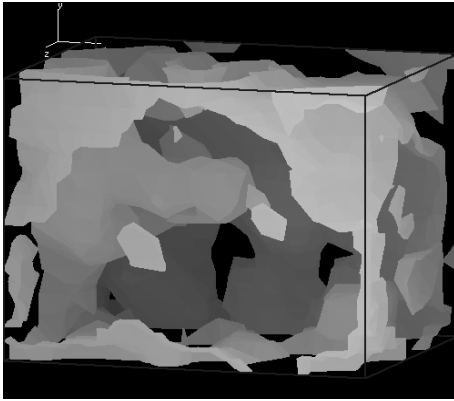
Fig. 4.15 Results of sphere wake flow using 4D PTV.



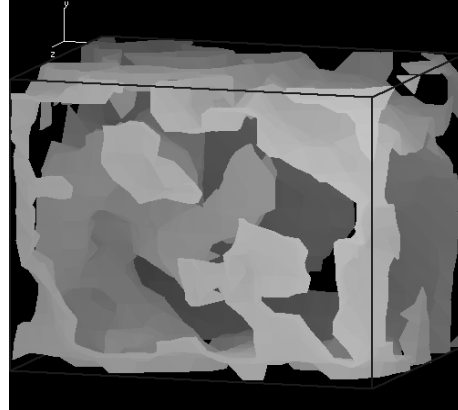
(a) 1/1024 (60 fps)



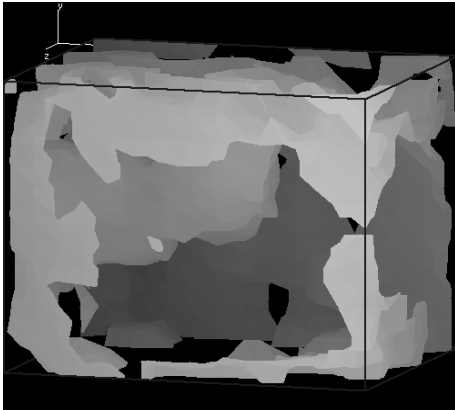
(b) 2/1024 (60 fps)



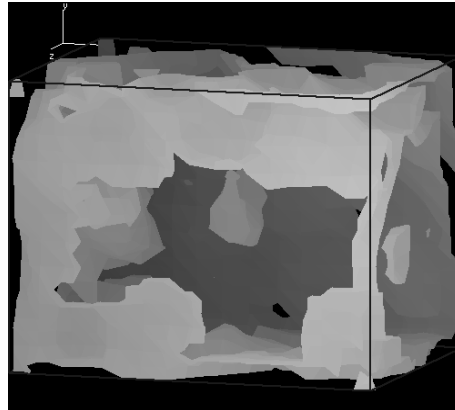
(c) 4/1024 (60 fps)



(d) 17/1024 (60 fps)

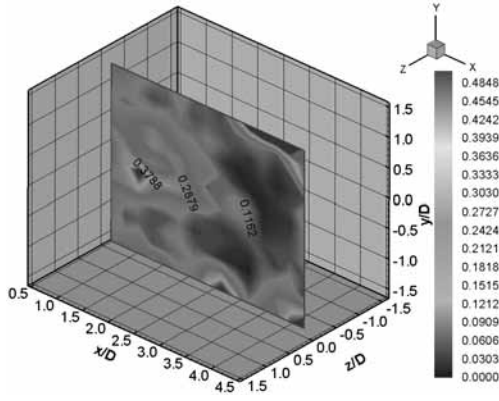


(e) 34/1024 (60 fps)

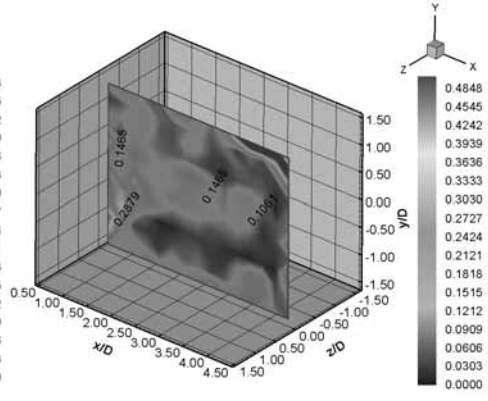


(f) 35/1024 (60 fps)

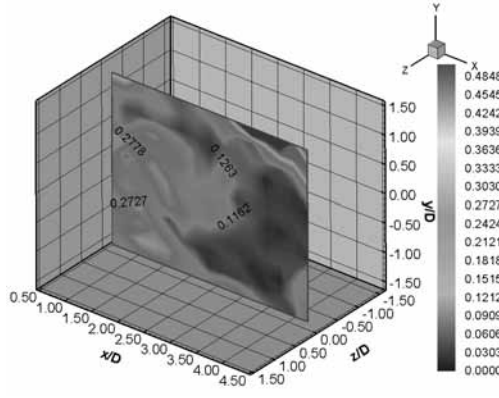
Fig. 4.16 Temporal evolution of the Cone-shape(C-shape) vortical structure.



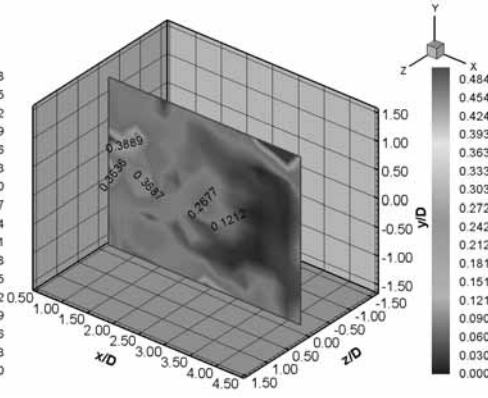
(a) xy section at $z/D=0.0 \ 1/1024$



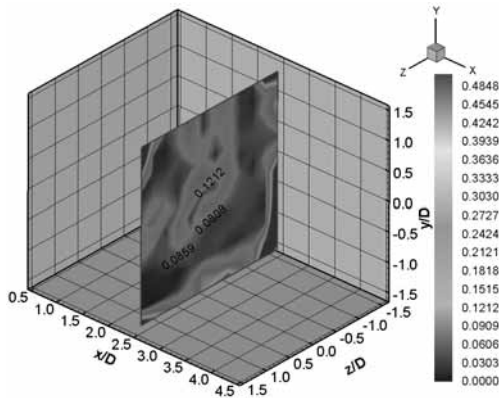
(b) xy section at $z/D=0.0 \ 4/1024$



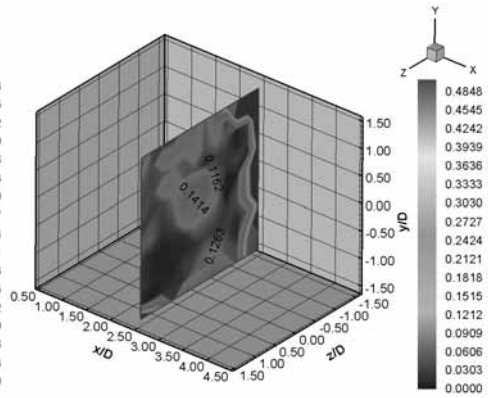
(c) xy section at $z/D=0.0 \ 17/1024$



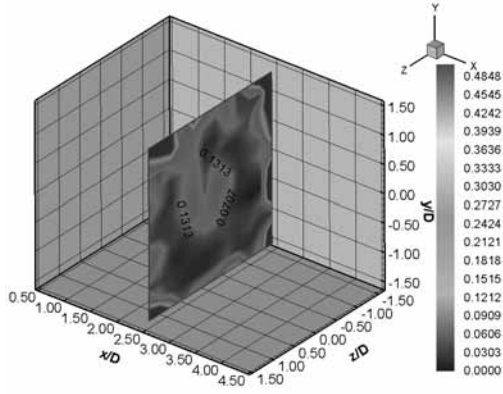
(d) xy section at $z/D=0.0 \ 35/1024$



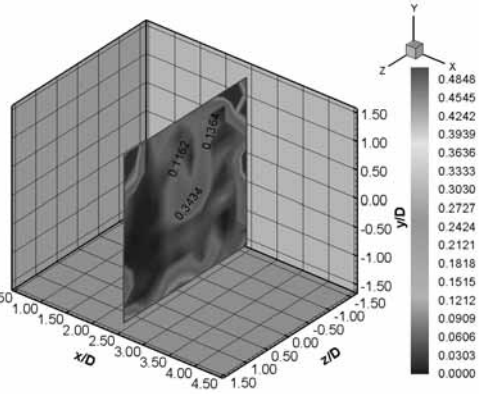
(e) yz section at $x/D=2.5 \ 1/1024$



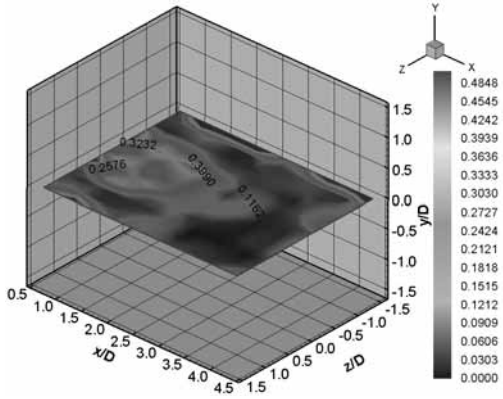
(f) yz section at $x/D=2.5 \ 4/1024$



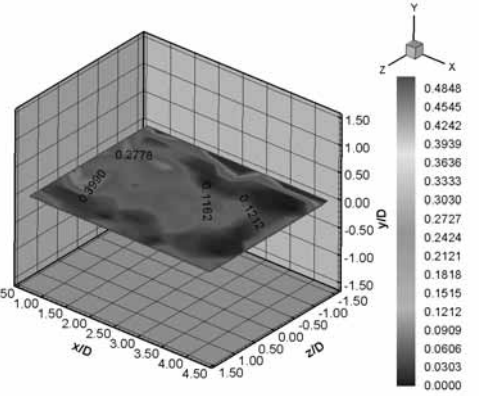
(g) yz section at $x/D=2.5 \ 17/1024$



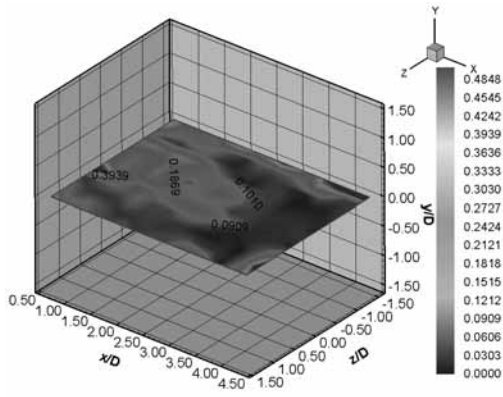
(h) yz section at $x/D=2.5 \ 35/1024$



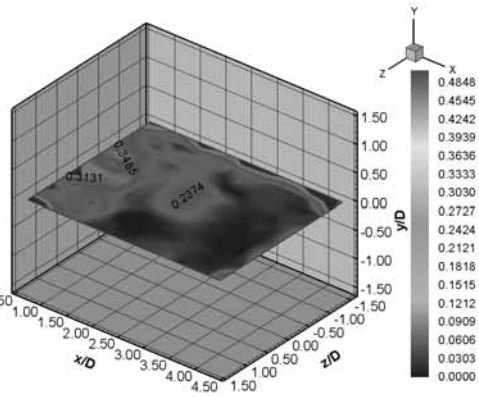
(i) xz section at $y/D=0.0 \ 1/1024$



(j) xz section at $y/D=0.0 \ 4/1024$

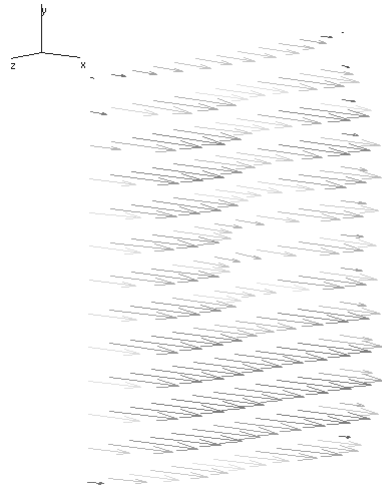


(k) xz section at $y/D=0.0 \ 17/1024$

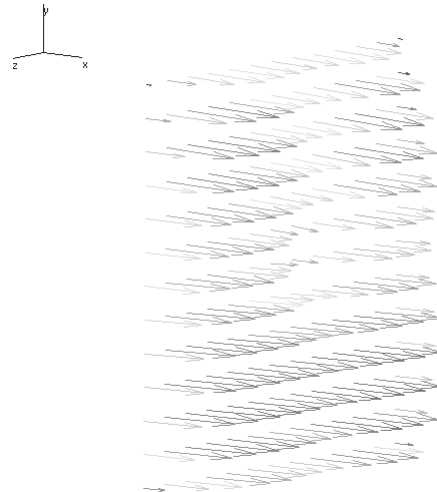


(l) xz section at $y/D=0.0 \ 35/1024$

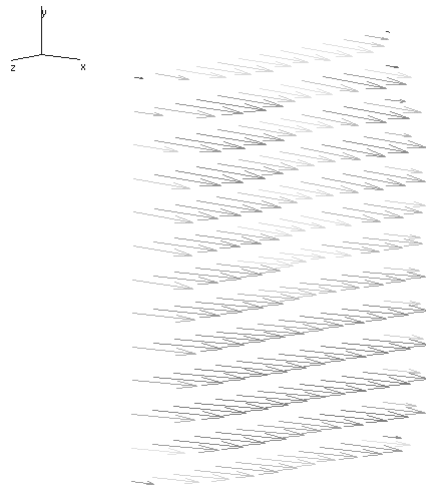
Fig. 4.17 Vorticity distribution each section (60 fps).



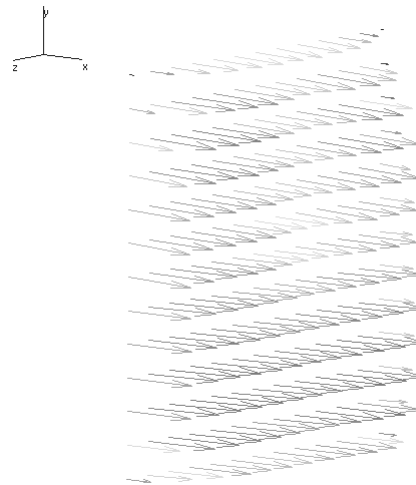
(a) $x/D=0.5$



(b) $x/D=1.0$

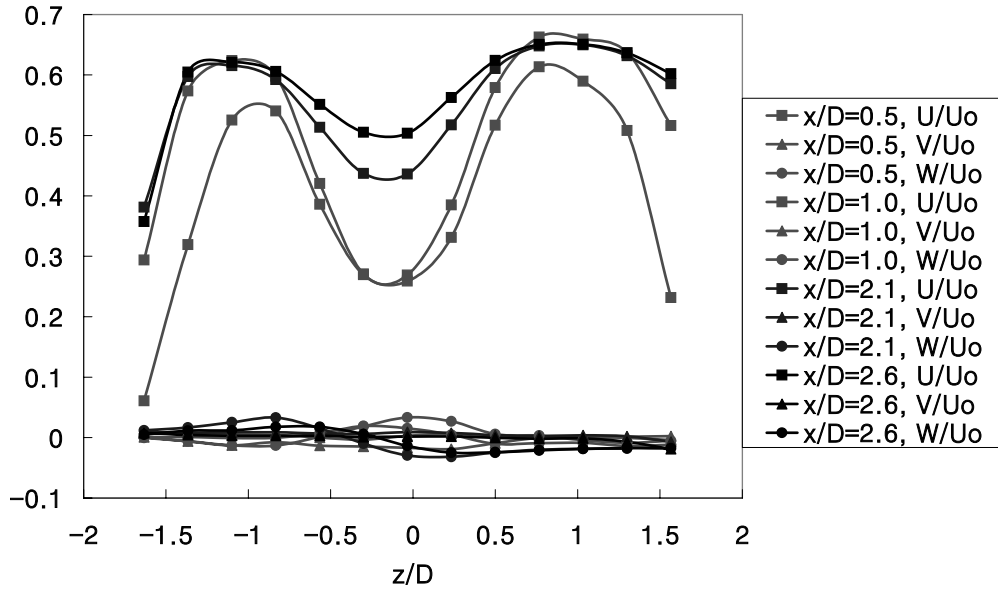


(c) $x/D=2.1$

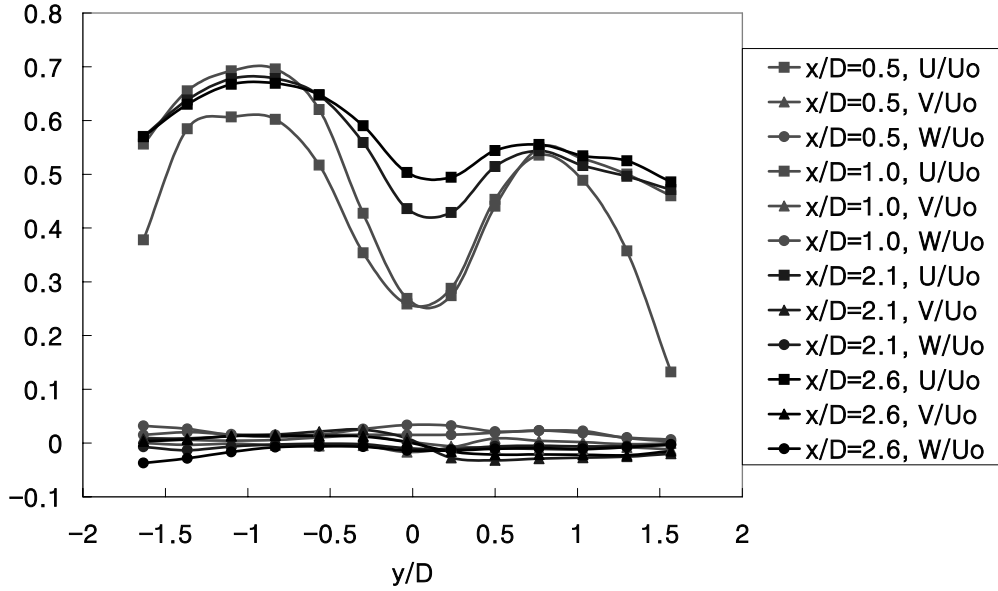


(d) $x/D=2.6$

Fig. 4.18 The mean velocity vector of yz plane.

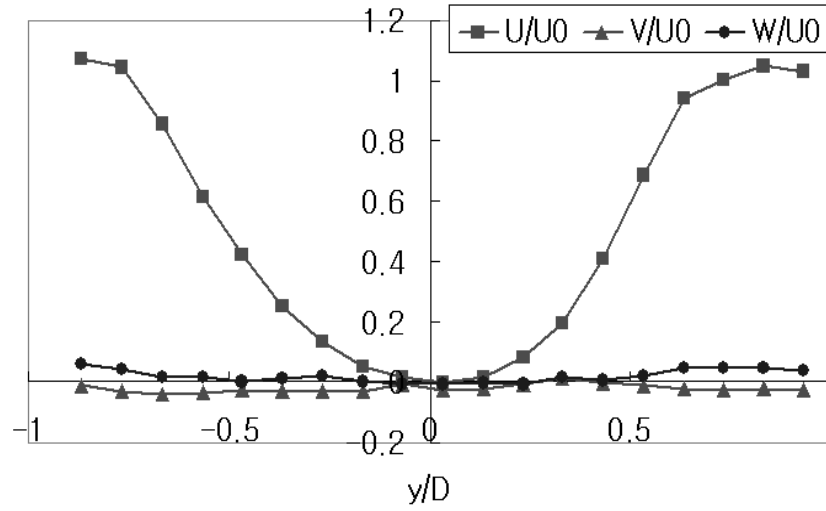


(a) xy plane at the $y/D = -0.03333$

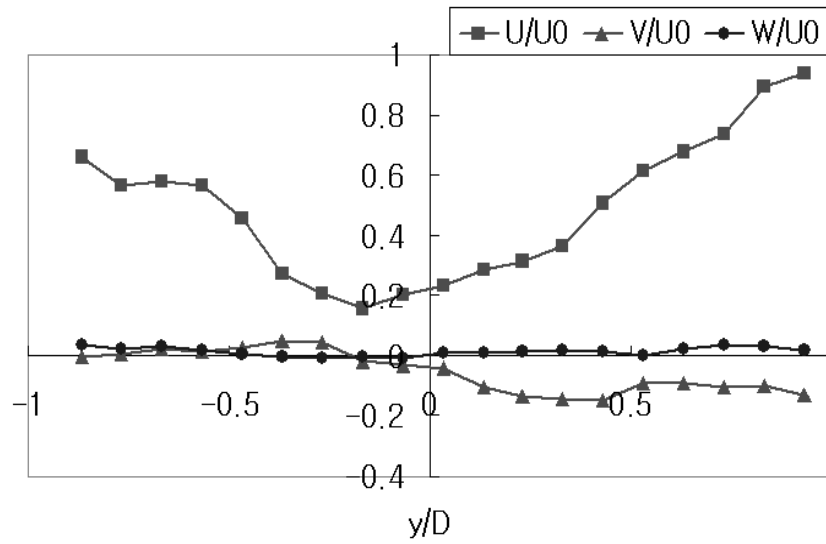


(b) xz plane at the $z/D = -0.03333$

Fig. 4.19 Dimensionless velocity profiles at each section.



(a) at the $x/D=1.033333$ & $z/D=0.033333$



(b) at the $x/D=2.533333$ & $z/D=0.033333$

Fig. 4.20 Dimensionless velocity of 3D PTV [Hwang].

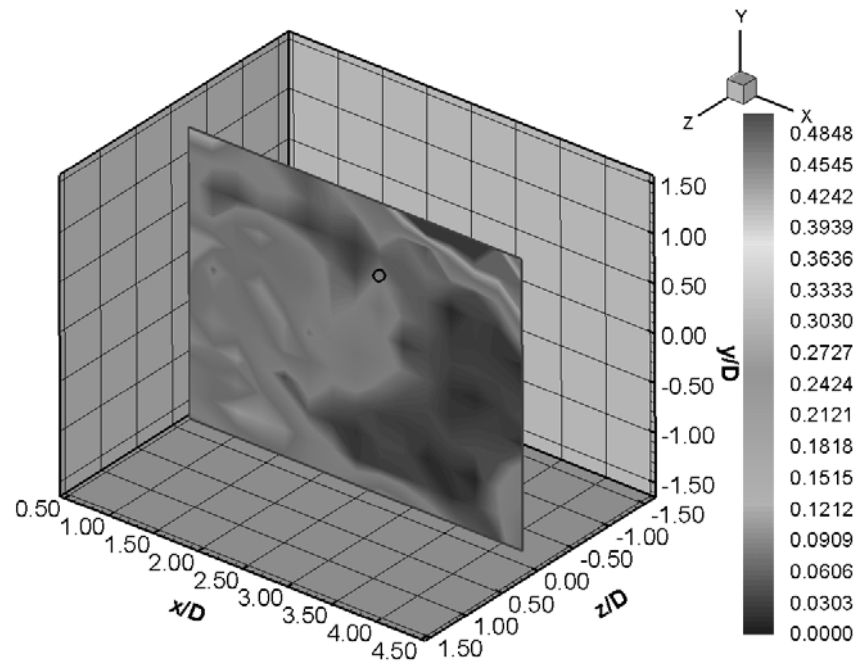


Fig. 4.21 Sampling point. ($x/D=2.90$, $y/D=0.77$, $z/D=-0.03$)

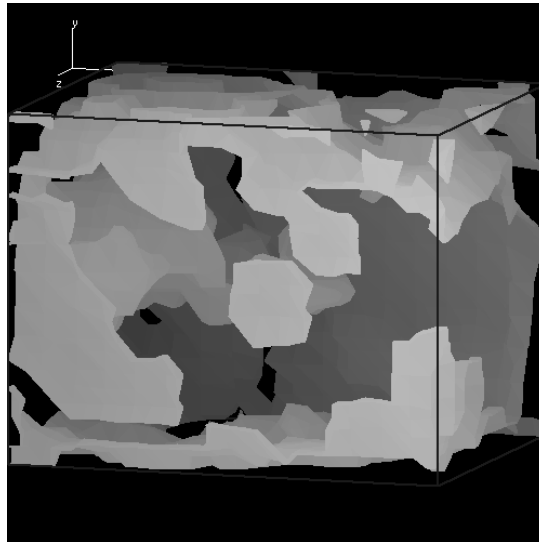
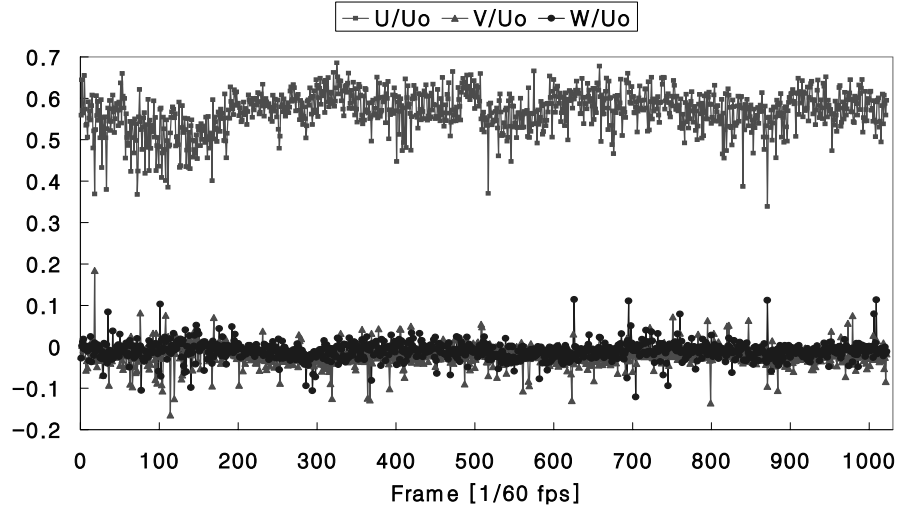
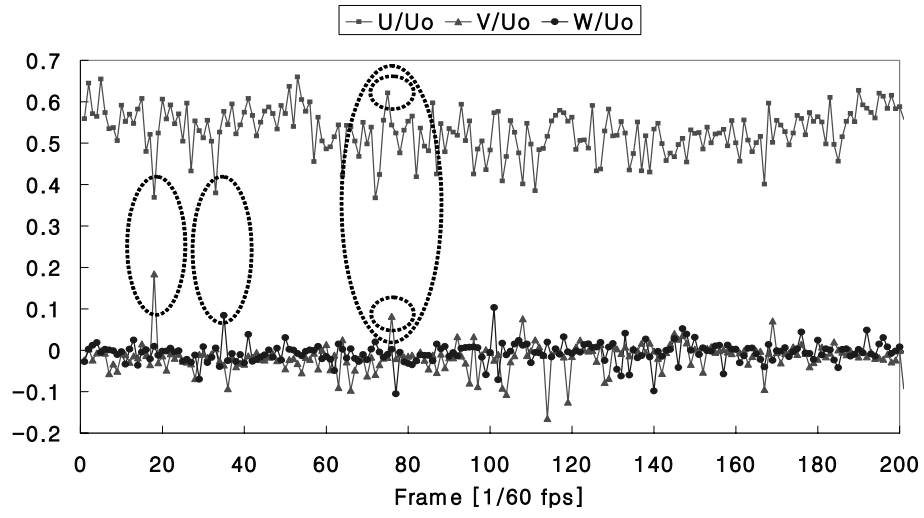


Fig. 4.22 C-shape becomes S shape by the outer flows.



(a)



(b)

Fig. 4.23 Temporal evolution of velocity components.

4.3.2 스테레오 PIV 측정 결과

4.3.2.1 평균 유동장 해석

Fig. 4.24은 SPIV에 의한 구 후면의 각 단면에 대한 속도분포를 나타낸 것으로 (a)~(c)는 xy 단면, (d)~(f)는 $x/D=1.0$ 에서의 yz 단면과 (g)~(i)는 $x/D=2.5$ 에서의 yz 단면을 각각 속도분포 및 유선(streamline)으로 표현하였다.

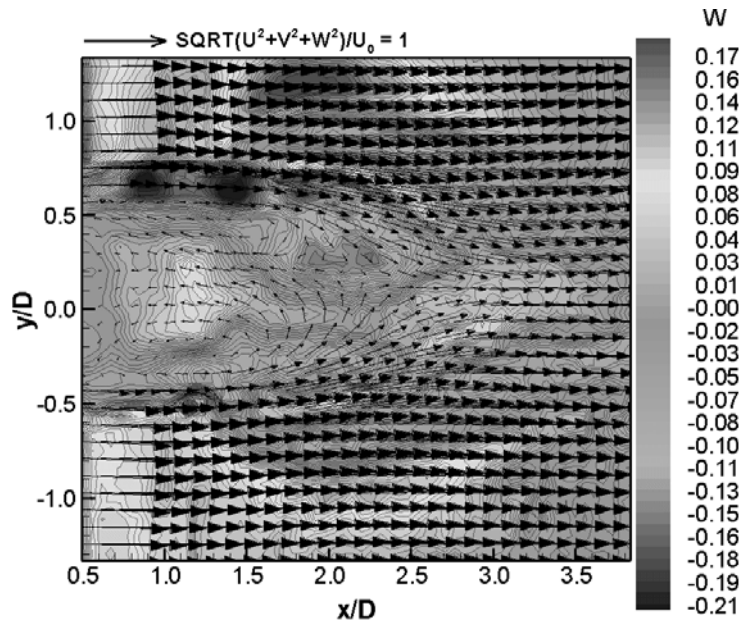
Fig. 4.24 (c)와 같이 xy 단면에서는 2개의 초점과 1개의 안장점을 갖고 있으며, F1은 $x/D=1.40$, $y/D=0.49$, $z/D=0.00$, F2는 $x/D=1.22$, $y/D=-0.24$, $z/D=0.00$, S는 $x/D=2.12$, $y/D=0.18$, $z/D=0.00$ 인 위치에 존재한다. 2개의 초점은 구 후면에 생성되는 부압에 의해 외부유동이 구 후면으로 유입되어 형성되는 것으로, S자 형태를 이루며 상.하부에 각각 1개씩 존재하며 서로 반대 방향으로 나선 운동을 하며 초점을 이룬다. 또한 안장점 S는 두 초점과 외부에서 유입되는 유동에 의해서 늘어나거나 줄어들며 이에 의해 F1의 위치도 시간이 지남에 아치형태를 이루는 경로를 따라 이동한다.

Fig. 4.24 (f)는 $x/D=1.0$ 에서의 yz 단면에 대한 유선으로 외부에서 역류해 들어오는 유동에 의해서 이 유동을 중심으로 좌.우에 각각 1개의 초점을 갖고 있으며, 이들 초점의 위치는 F1은 $x/D=-0.14$, $y/D=-0.38$, $z/D=0.00$, F2는 $x/D=3.14$, $y/D=-0.25$, $z/D=0.00$ 인 곳이며, 내부셀 유동에서 형성되는 헤어핀 구조의 중심이 된다. 또한 2개의 안장점을 갖고 있으며, 이들의 위치는

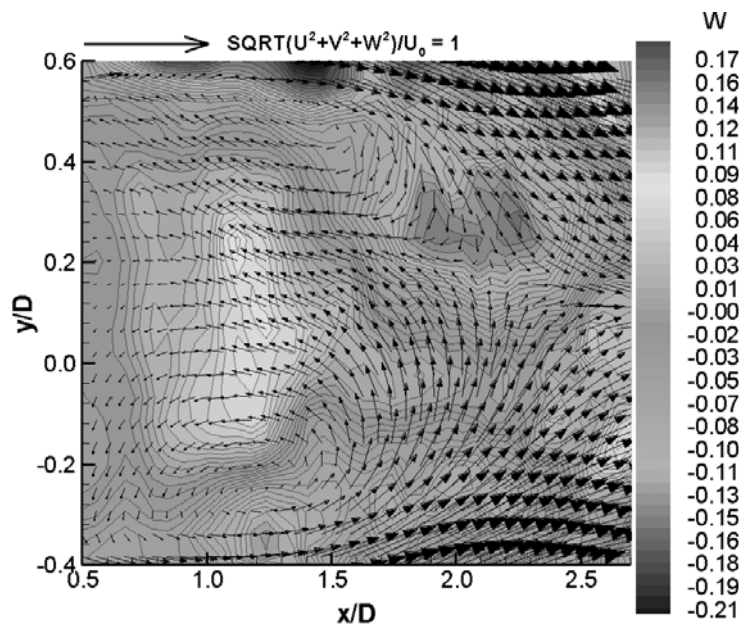
S1은 $x/D=-0.53$, $y/D=0.08$, $z/D=0.00$, S2는 $x/D=0.53$, $y/D=-0.30$, $z/D=0.00$ 이다.

Fig. 4. 24 (i)는 $x/D=2.5$ 인 지점에서의 yz 단면에 대한 유선으로써, 구 후면의 영향은 다소 줄어들었으나, 구 후면에서의 부압의 영향으로 외부 속도 보다는 실속이 이루어지고 있으며, $x/D=1.0$ 인 지점에 비해 구 후면의 부압의 영향이 작으므로 초점이나 안장점을 형성하지 못하고 노드를 형성한다. 이 때 노드의 위치는 다음과 같다. 노드 N은 $x/D=-0.04$, $y/D=0.09$, $z/D=0.00$ 이다.

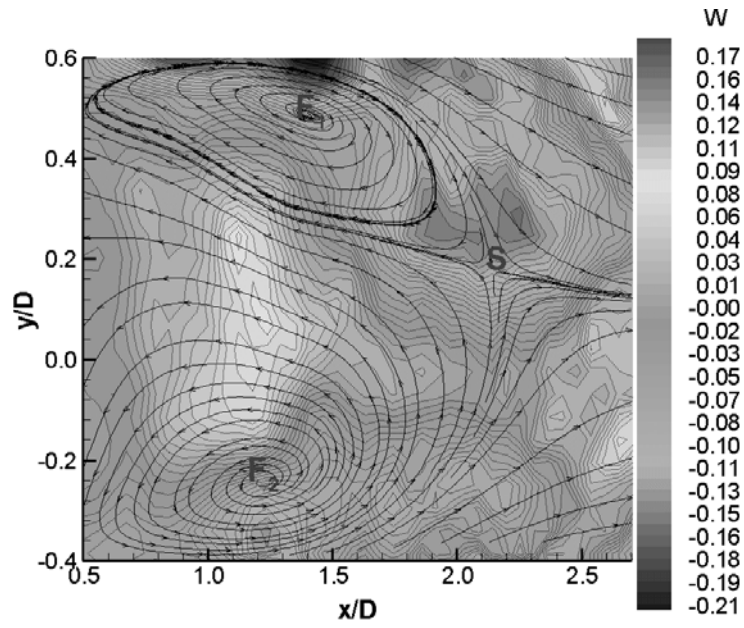
xy 단면의 경우 구 후류의 끝에 해당하는 꼬리부가 주기적으로 움직임을 보이고 있으며, yz 단면의 경우 구 후면의 부압부에 의한 속도벡터의 역류가 진행됨을 보여주고 있다.



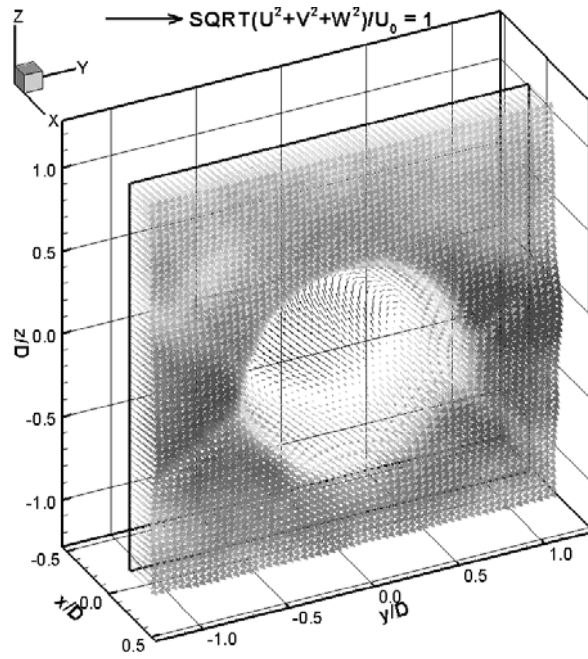
(a) Mean vectors at xy section



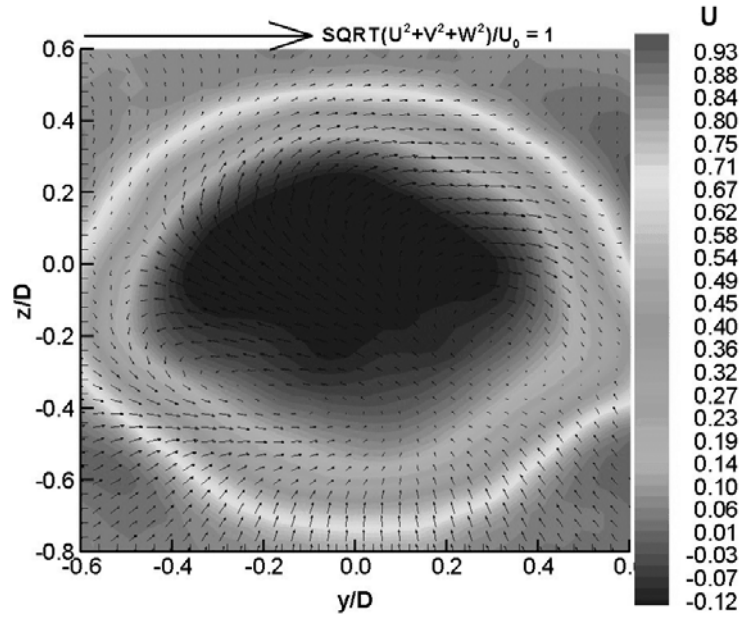
(b) Magnification of mean vectors at xy section



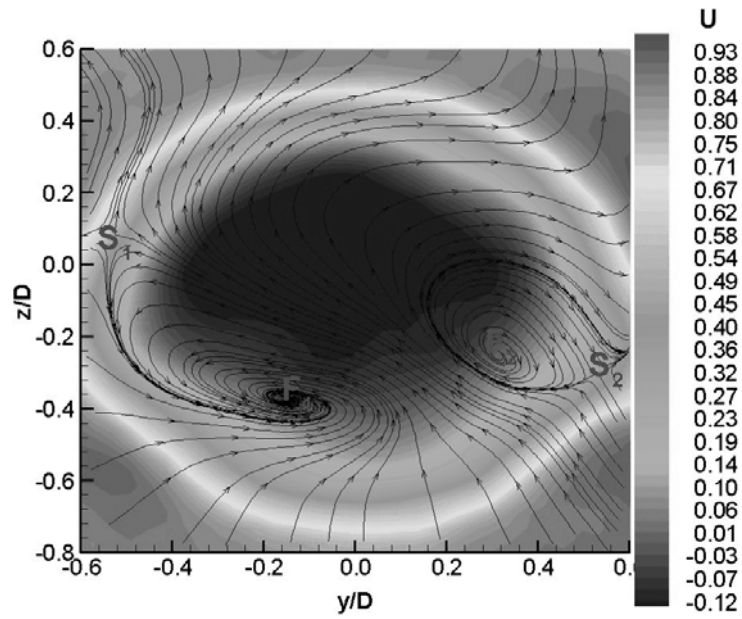
(c) Stream line with W component at xy section



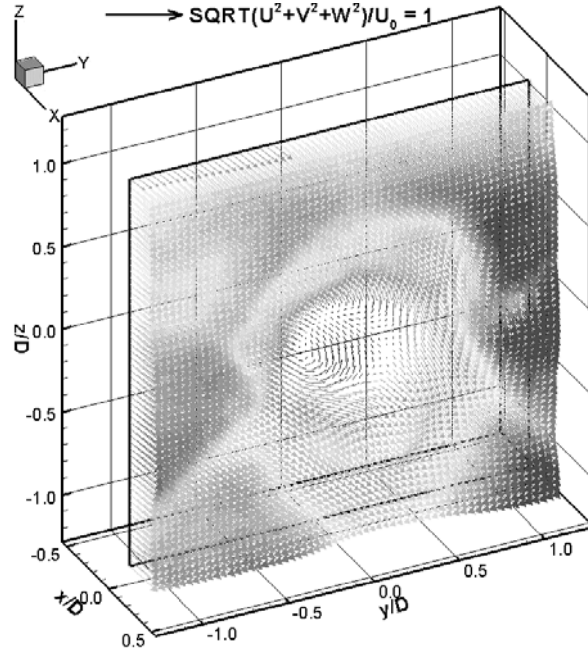
(d) Mean vectors of volume distribution at $x/D=1.0$ of yz section



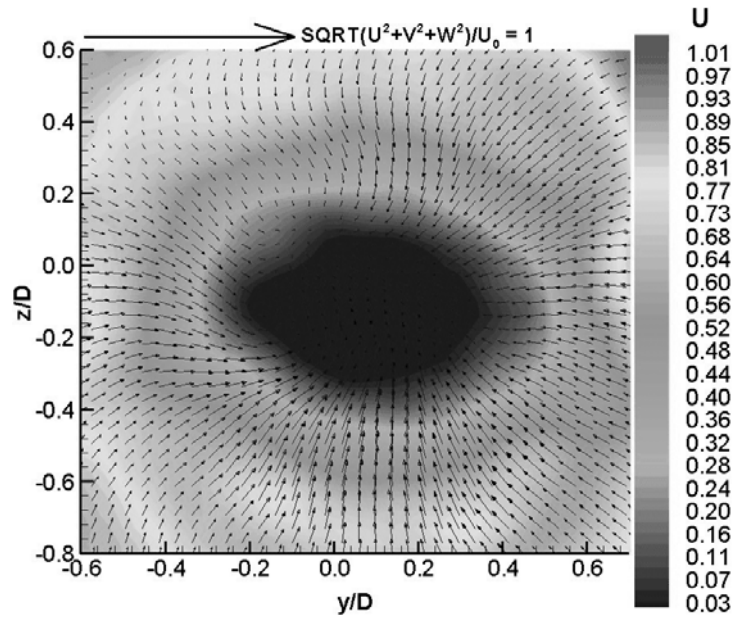
(e) Magnification of mean vectors at $x/D=1.0$ of yz section



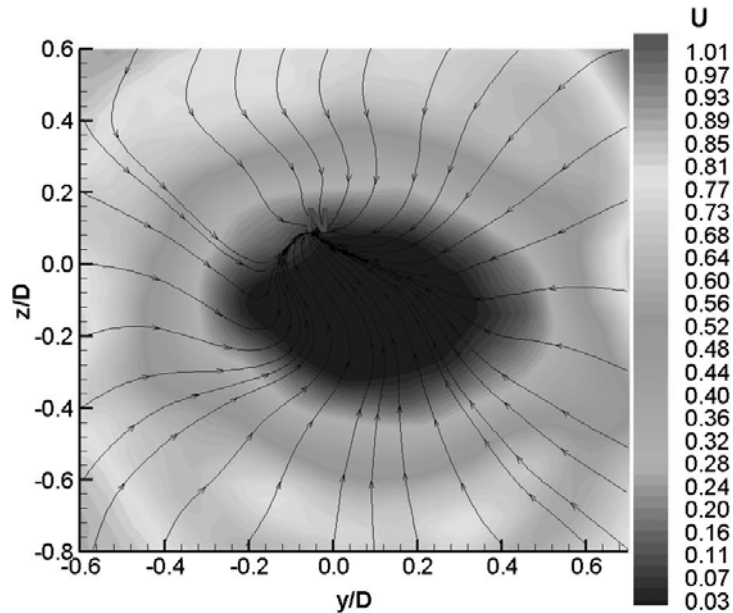
(f) Stream line with U component at $x/D=1.0$ of yz section



(g) Mean vectors of volume distribution at $x/D=2.5$ of yz section



(h) Magnification of mean vectors at $x/D=2.5$ of yz section



(i) Stream line with U component at $x/D=2.5$ of yz section

Fig. 4.24 Mean velocity distribution of SPIV at each section.

4.3.2.2 평균 물리량 해석

난류는 속도, 압력 등과 같은 물리량들의 시간과 공간에 따른 유체의 부규칙한 운동으로써, 물질간 에너지 교환이나 혼합 등에 유용하게 사용된다. Fig. 4.25는 xy 단면에서의 물리량 중 (a), (b) 그리고 (c)는 각 성분에서의 난류강도를 나타내는 것으로, 이 난류강도는 속도변동성분과 연관되어지며, 유동장 해석에 지배적인 영향을 미친다. Fig. 4.25 (a)는 SPIV에서 TIU를 나타낸 것으로 $x/D=0.5$ 지점에서 y/D 가 -0.5와 약 0.6지점에서 TIU가 강하게 나타남을 보여주고 있는데, 이는 이 지점에서 구에서의 박리에 의해 U방

향으로의 속도변화가 심하게 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 $x/D=2.0$ 이후에 $y/D=0.6$ 지점에서 TIU가 강하게 집중됨을 확인할 수 있는데, 이는 평균 유동장에서 초점이 위치하는 곳으로 외부에서 유입되는 유속의 영향으로 안장점의 늘어나고 줄어듬에 따라 초점도 이에 맞게 이동을 하게 되며, TIU가 집중된 영역이 초점의 이동 경로와 거의 유사함을 확인하였다.

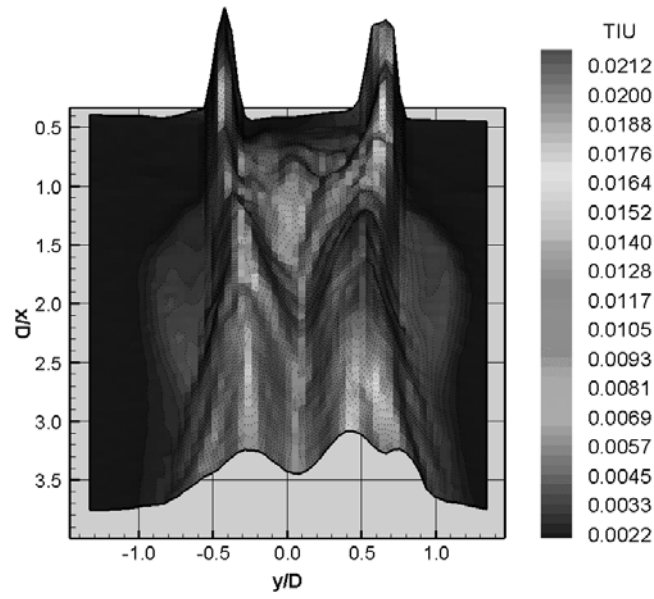
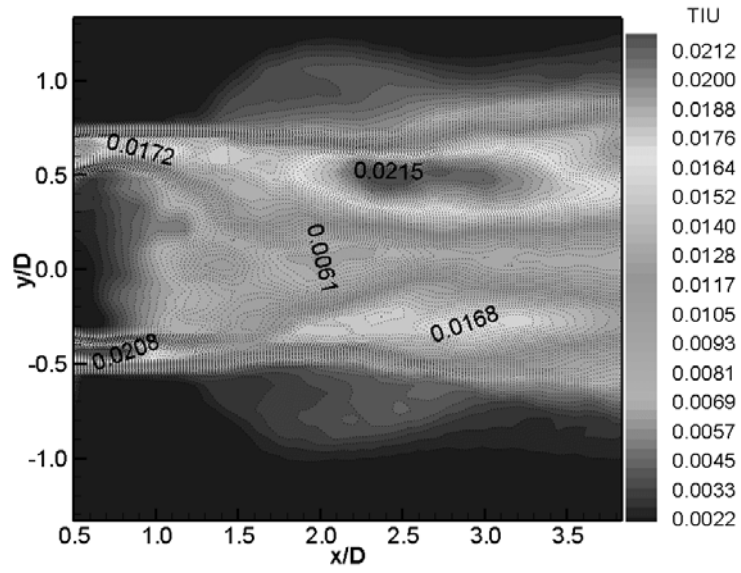
Fig. 4.25 (b)는 TIV 성분을 나타낸 것으로, 구 내부의 부압에 의해 내부 셀 구조가 형성되며, 이에 따라 외부에서 유입되는 유속의 영향으로 y방향으로 진동하는 운동을 하게 되며, 이는 상기 제시되어진 바와 같이 내부셀의 구조가 시간이 지남에 따라 S자 운동을 하며, 목부근이 가늘어졌다가 떨어져나감을 확인하였는데, 이 와 연관이 있음을 시사한다. 즉 내부에서 특정 주기를 가지고 y방향으로 진동을 하다가 어느 순간에 떨어져 나가는 것이다. 또한 이는 평균유동장에서 S자형태를 이루는 두 초점과 연관이 있는 것으로, 주위 유동에 따라 상.하부의 초점이 강하게 성장하여 내부셀의 꼬리는 초점이 강한 부분과 반대방향으로 향함을 확인하였다.

Fig. 4.25 (c)는 TIW를 나타낸 것으로, 구박리에 의한 z성분의 속도성분의 변화가 주됨을 확인할 수 있으며, Fig. 4.25 (d)는 난류운동에너지를 나타낸 것으로, Fig. 4.25 (c)와 그 패턴이 유사한 것으로 보아, 구후류 유동에 있어 난류운동에너지에 가장 큰 원인을 제공하는 것은 TIW성분임을 확인할 수 있었다.

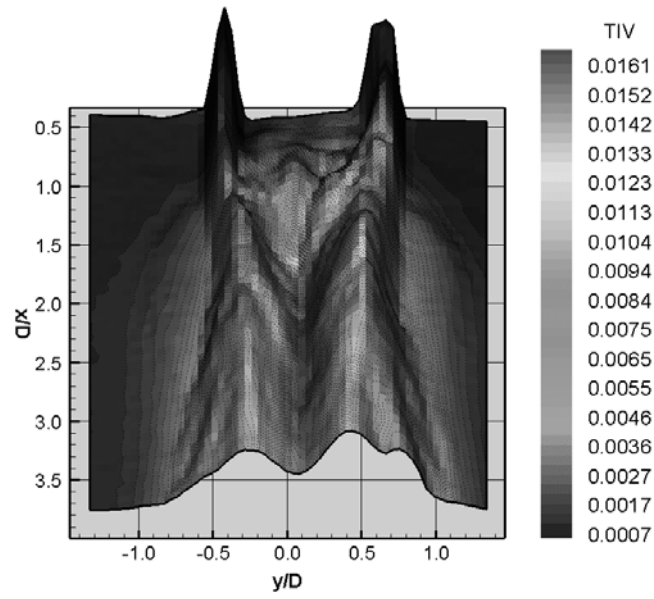
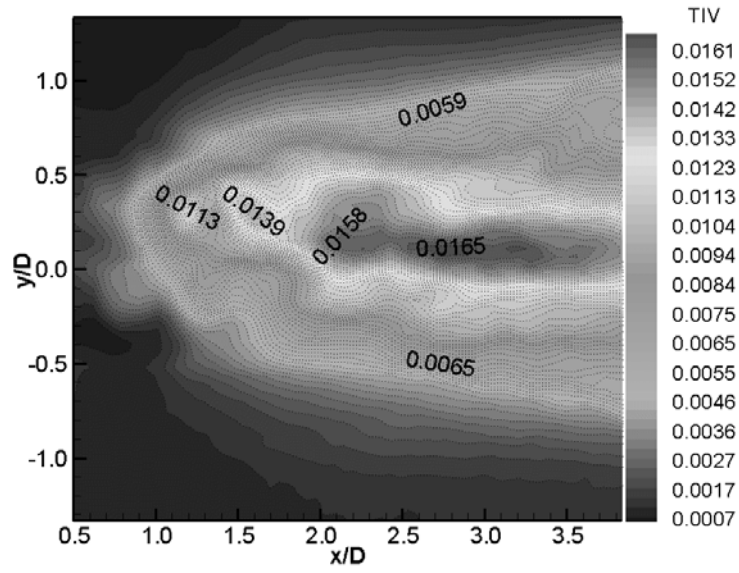
난류응력은 유동방향에서의 불규칙한 운동을 나타내는 것으로, (e)는 RUV, (f)는 RVW, (g)는 RWU를 나타낸 것이다. (e)의 경우는 상기 기술한 바와 같이 초점의 이동 경로를 나타낸다.

Fig. 4.26 는 $x/D=1.0$ 에서 yz 단면에 대한 물리량을 나타낸 것으로, (a)는 TIV를 (b)는 TKE를 (c)는 RVW를 나타낸 것이다. 또한 Fig. 4.27은 $x/D=2.5$ 에서 yz 단면에 대한 물리량을 나타낸 것으로, 구 후면에 부압에 따른 유동현상을 잘 표현하고 있다. 또한 yz 면의 평균유동장에서 외부에서 유입되어 들어오는 유속을 중심으로 좌.우의 초점이 형성되는데 이 부분이 바로 헤어핀 구조의 중심점이 된다.

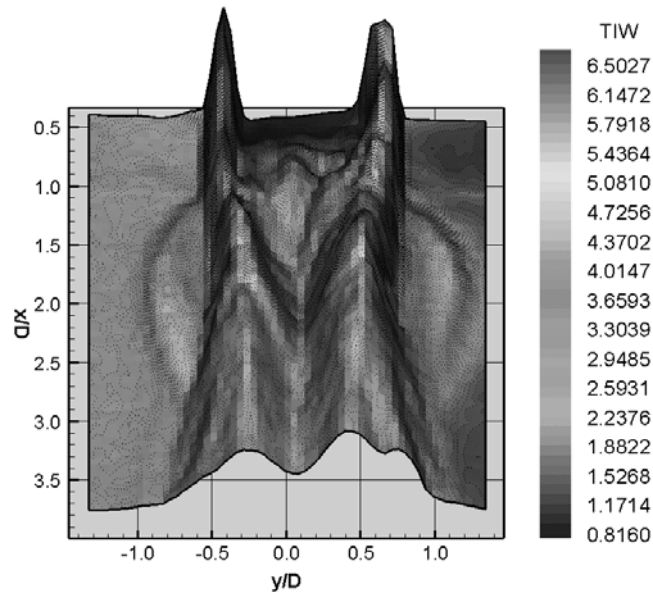
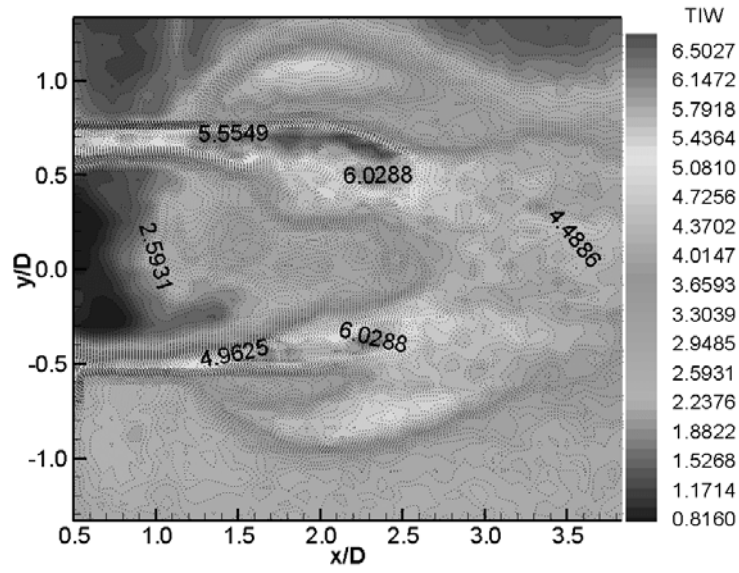
xy 단면에서의 평균 물리량을 나타내는 것으로 난류강도 및 난류운동에너지가 모두 대칭형태를 이루고 있음을 확인할 수 있으며, 특히 TKE의 경우 TIW가 지배적임을 확인할 수 있었다. yz 단면에서의 TIV 및 TKE를 나타낸 것으로 x/D 의 거리가 스트림 방향에서 멀어짐에 따라 난류강도 및 난류운동에너지가 약해짐을 확인할 수 있다.



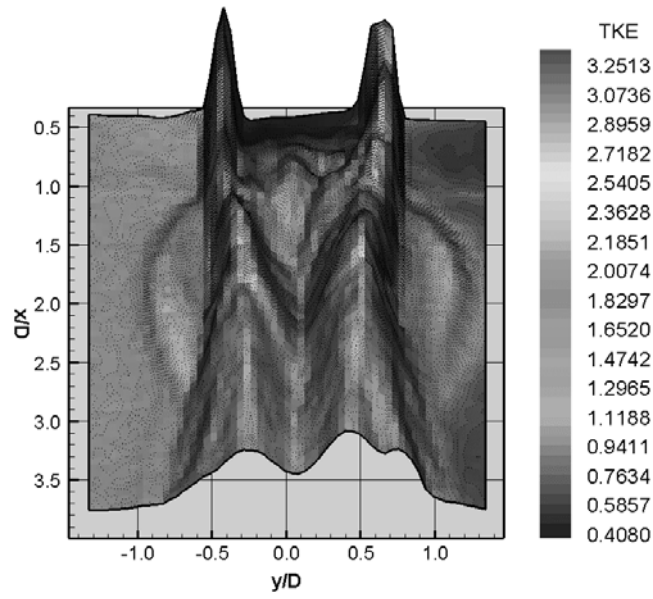
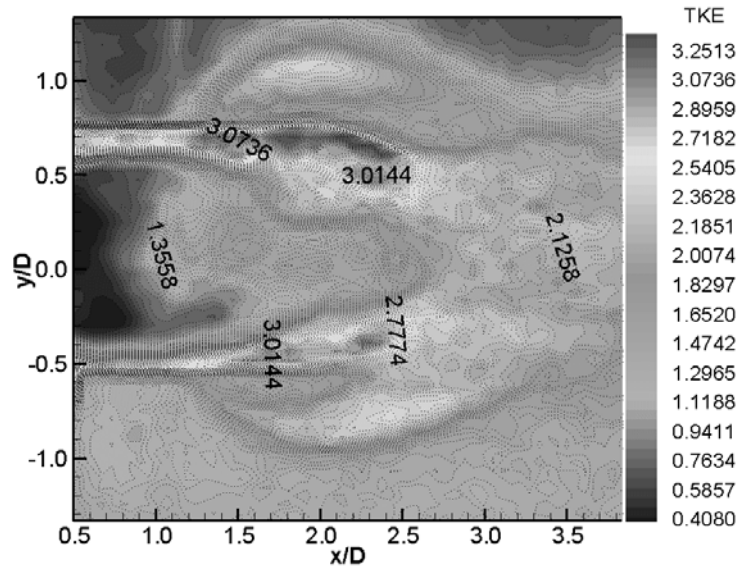
(a) Turbulent Intensity of U component



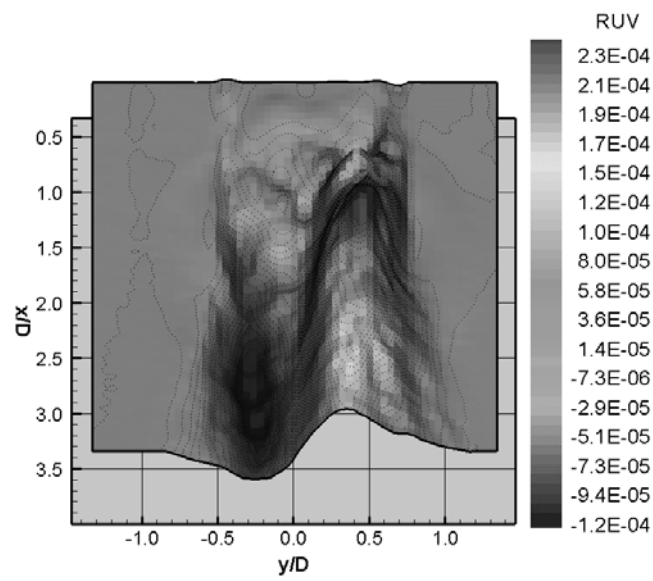
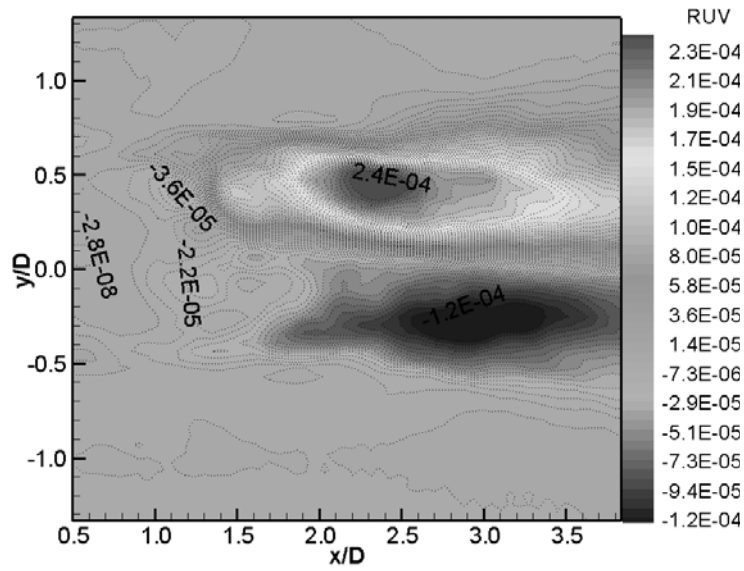
(b) Turbulent Intensity of V component



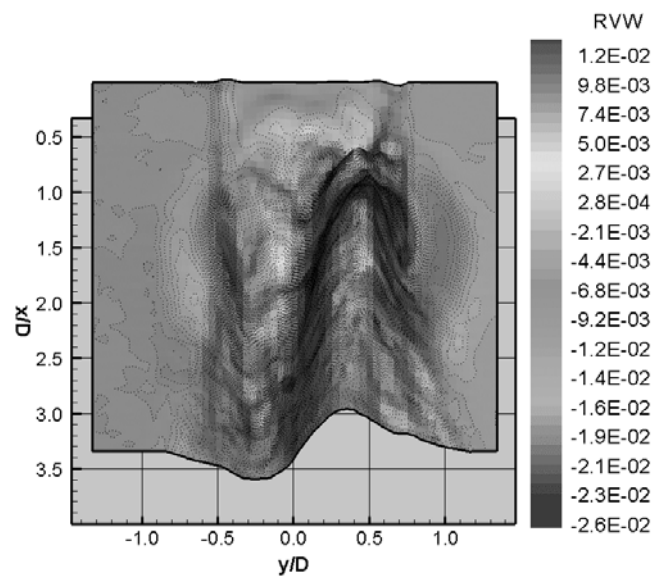
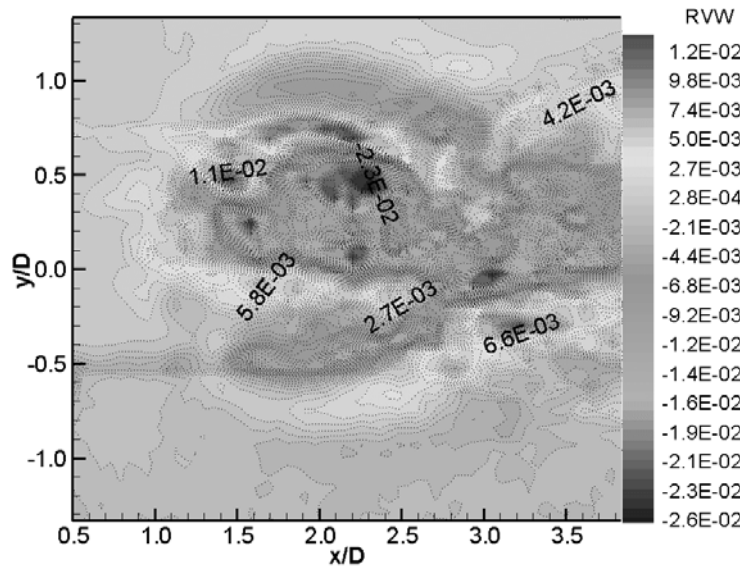
(c) Turbulent Intensity of W component



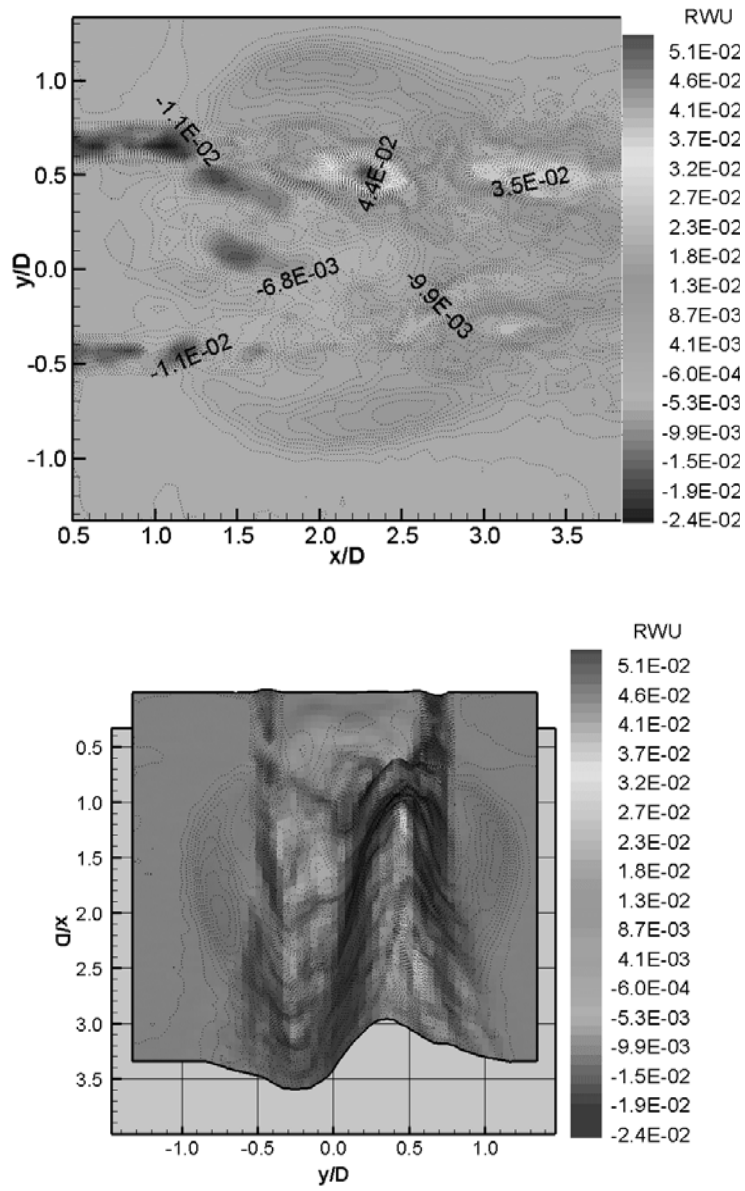
(d) Turbulent Kinetic Energy



(e) Reynolds stresses of UV component

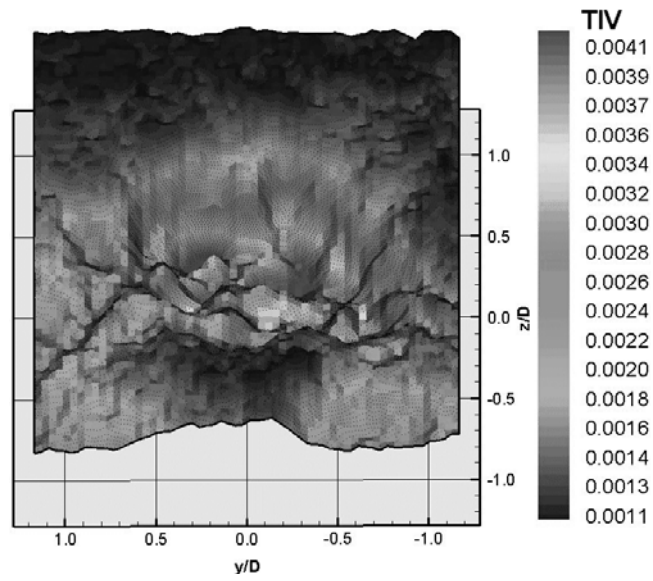
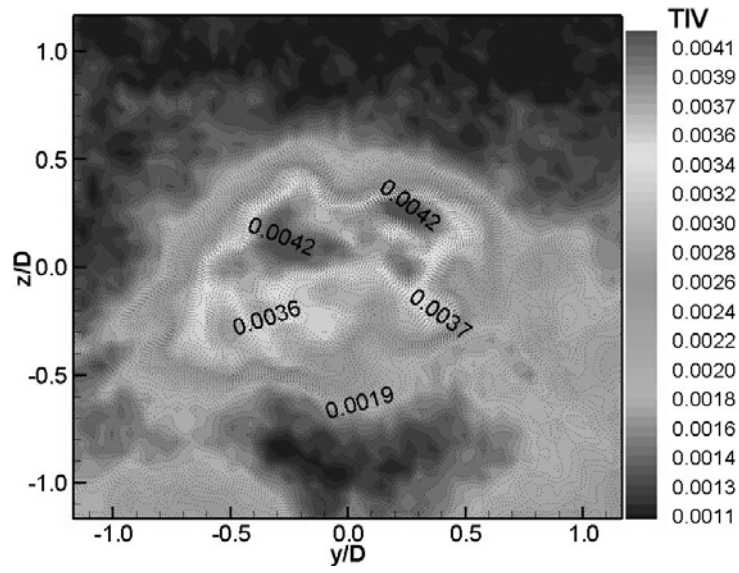


(f) Reynolds stresses of VW component

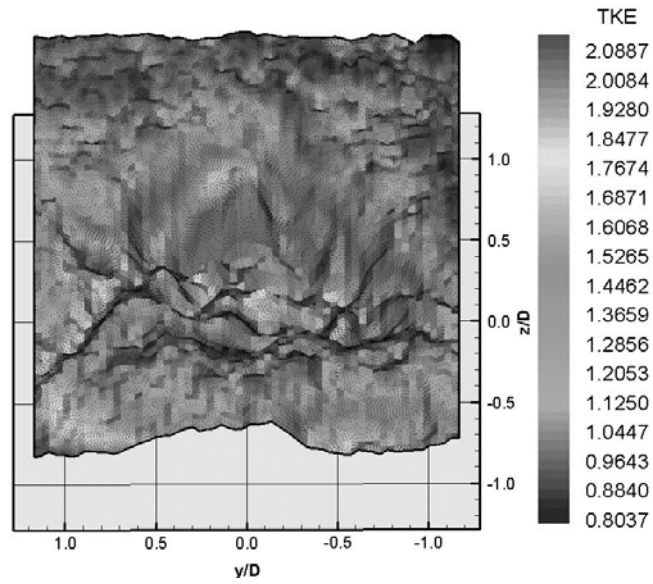
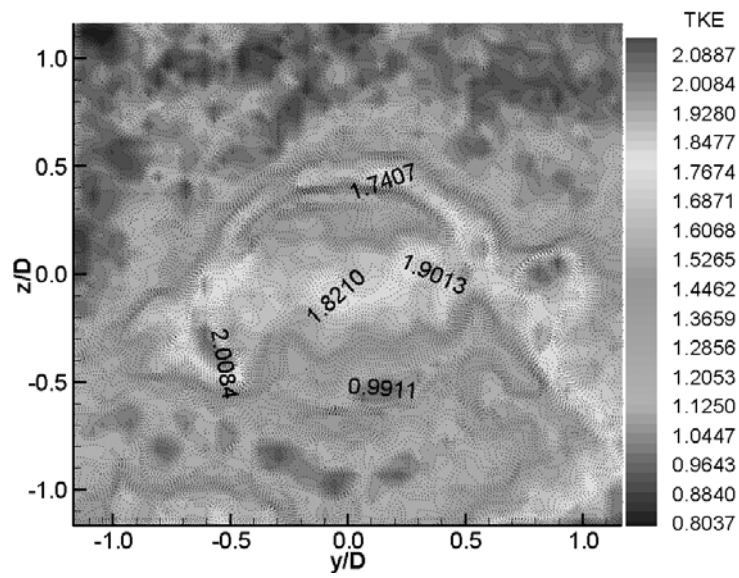


(g) Reynolds stresses of WU component

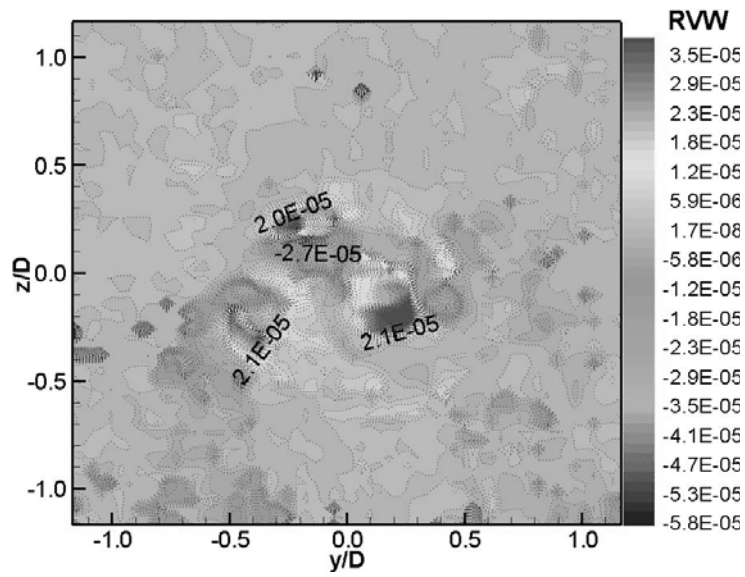
Fig. 4.25 Physical quantity of SPIV at xy section.



(a) Turbulent Intensity of V component

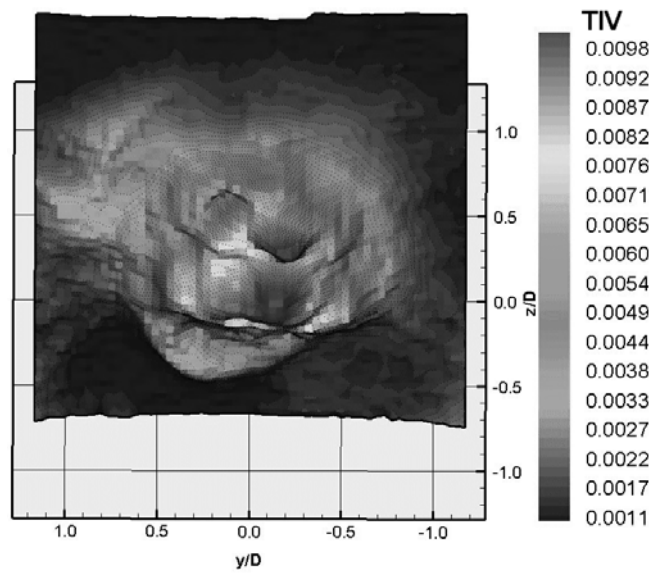
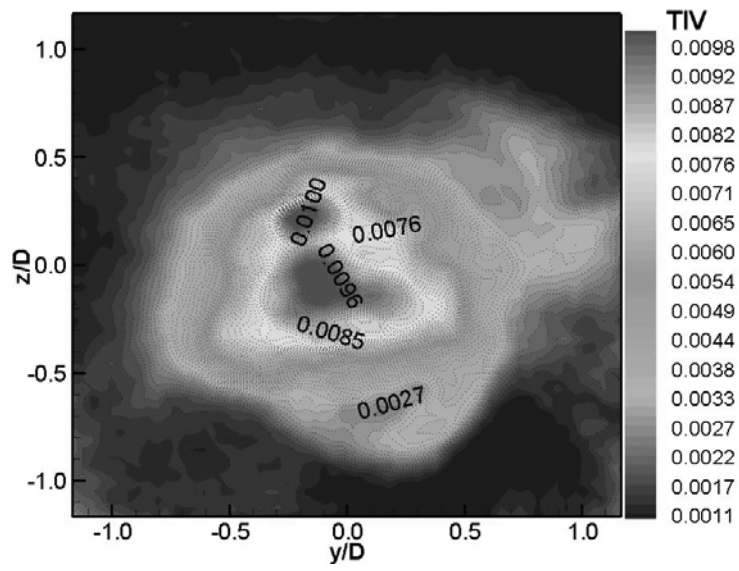


(b) Turbulent Kinetic Energy

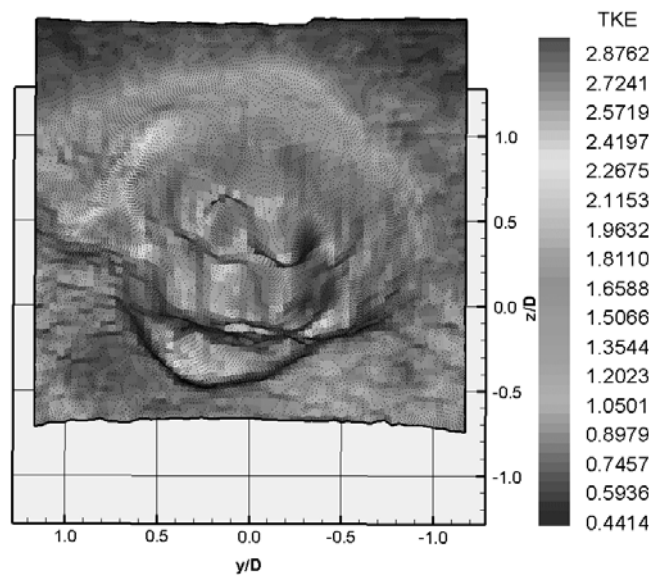
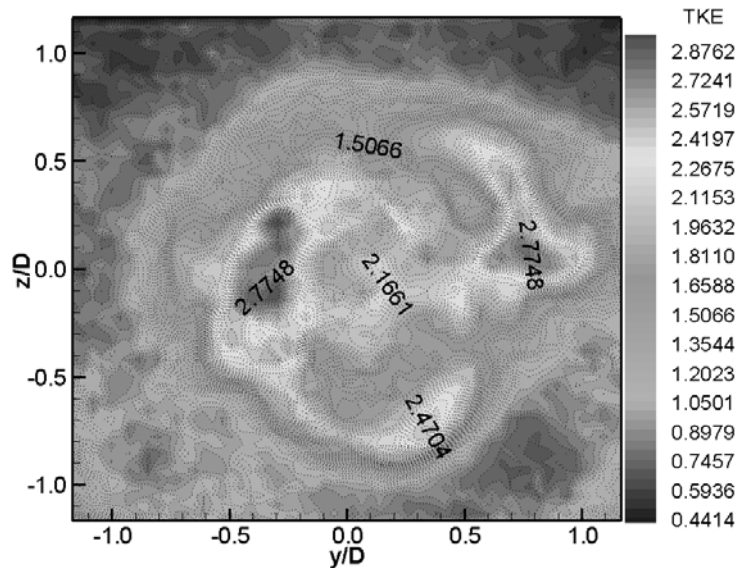


(c) Reynolds stresses of VW component

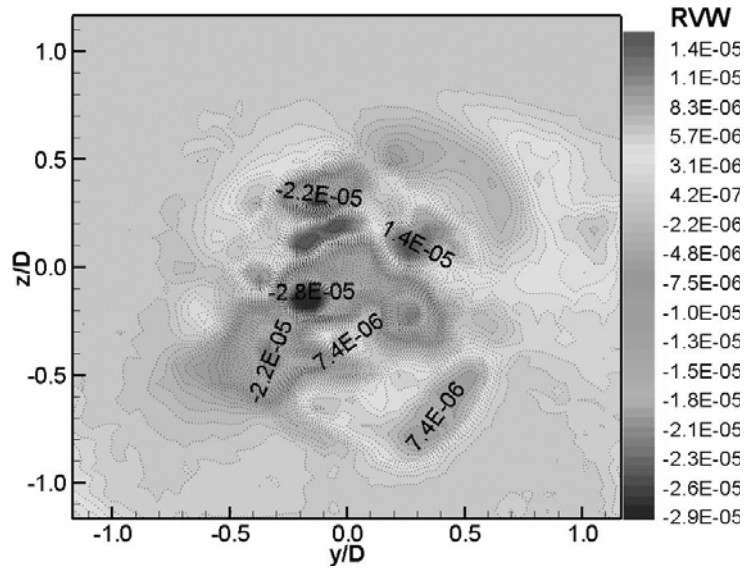
Fig. 4.26 Physical quantity of SPIV at yz section. ($x/D=1.0$)



(a) Turbulent Intensity of V component



(b) Turbulent Kinetic Energy



(c) Reynolds stresses of VW component

Fig. 4.27 Physical quantity of SPIV at yz section. ($x/D=2.5$)

4.3.2.3 순시 유동장 해석 및 유동구조 분석

Fig. 4.28은 각 단면에 대한 시간 추이를 위한 샘플링 포인트를 표시한 것으로 (a)는 yz 단면에 대해 A, B에 대해서 데이터를 획득하였으며, (b)는 zx 단면에 대해 A, B에 대해서 데이터를 획득하였다. (a)의 A는 $x/D=2.31$, $y/D=0.29$ 인 점과 B는 $x/D=2.99$ $y/D=0.70$ 인 점으로 하였으며 (b)의 A는 $y/D=0.02$ $z/D=0.02$ 인 점과 B는 $y/D=0.49$ $z/D=0.02$ 인 점에 대해서 x/D 에 따라 각각 그래프로 나타내었다.

Fig. 4.29은 샘플링 포인트에서 추출된 무차원 속도를 그래프로 나타낸

것이다. Fig. 4.29 (a)는 3 성분이 거의 일정한 주기가 있음을 나타내고 있다. Fig. 4.29 (b)의 경우는 특정 순간에만 급속한 유속의 변화가 생김을 시사하고 있다. 즉 218번째 프레임과 499번째 프레임에서 급속한 유속의 변화가 생겼다. Fig. 4.29에서 (c)와 (d)는 $x/D=1.0$ 일 때, (e)와 (f)는 $x/D=2.5$ 일 때의 yz 단면에서의 유속변화를 해당 샘플링 포인트에서 유속의 변화를 나타낸 것으로, 특히 Fig. 4.29 (c)의 경우, 즉 $y/D=0.02$, $z/D=0.02$ 인 거의 원점에 가까운 점에서 이들 무차원 속도값에 대하여 FFT 변환을 해본 결과 Fig. 4.30 (a), (b), (c) 모두 13.18Hz라는 공통된 특성주파수를 나타내었다. 이는 yz 단면상에서 구 후면의 유동주파수 즉 외부에서 구 후면의 원점으로 유입되어 들어오는 주기가 13Hz 정도임을 시사한다.

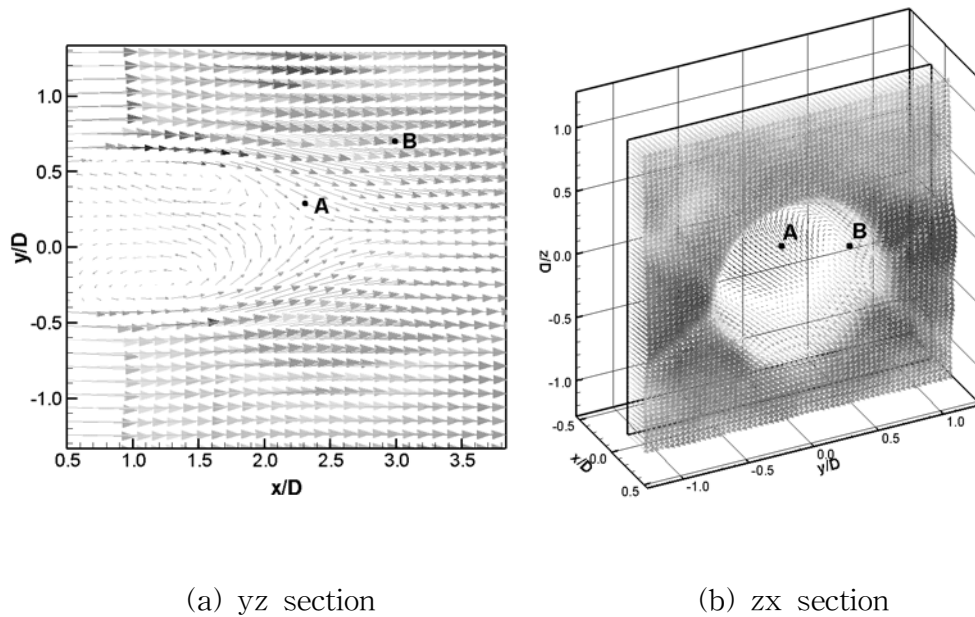
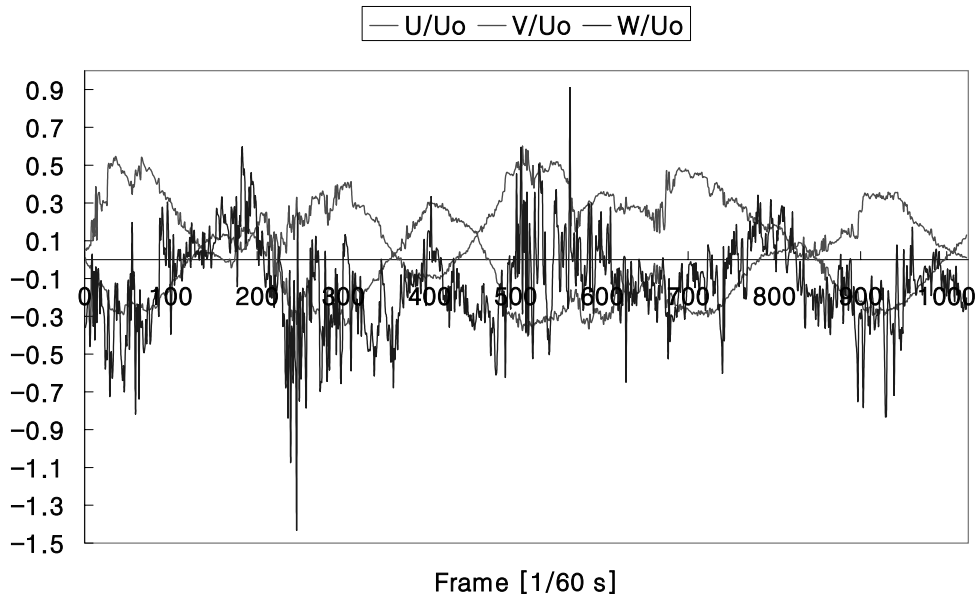
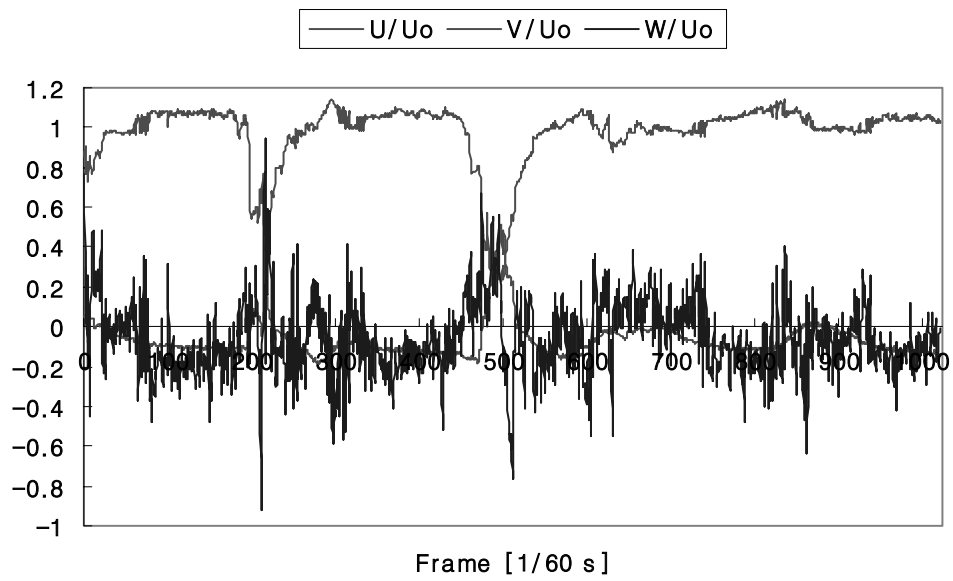


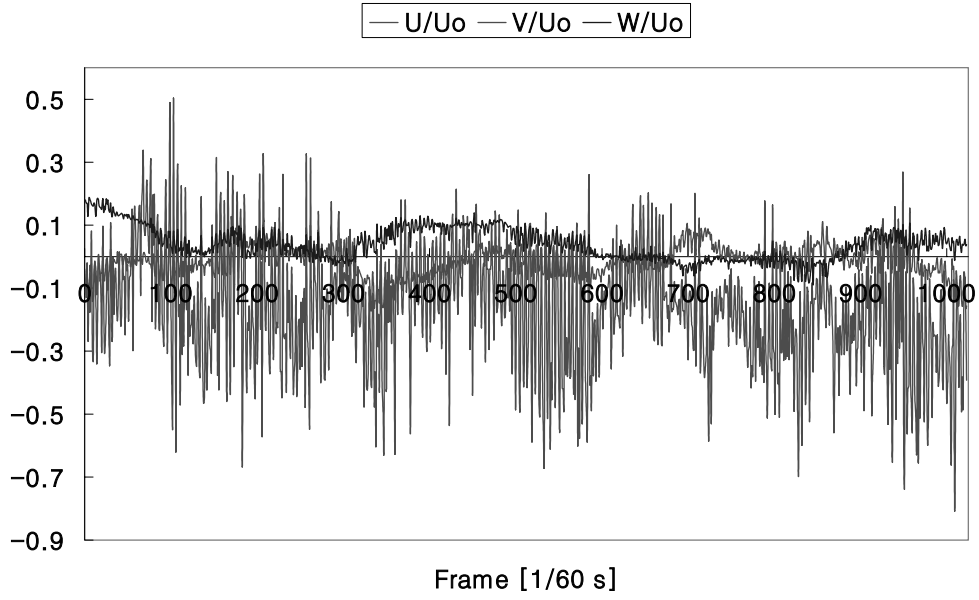
Fig. 4.28 Sampling point for time history.



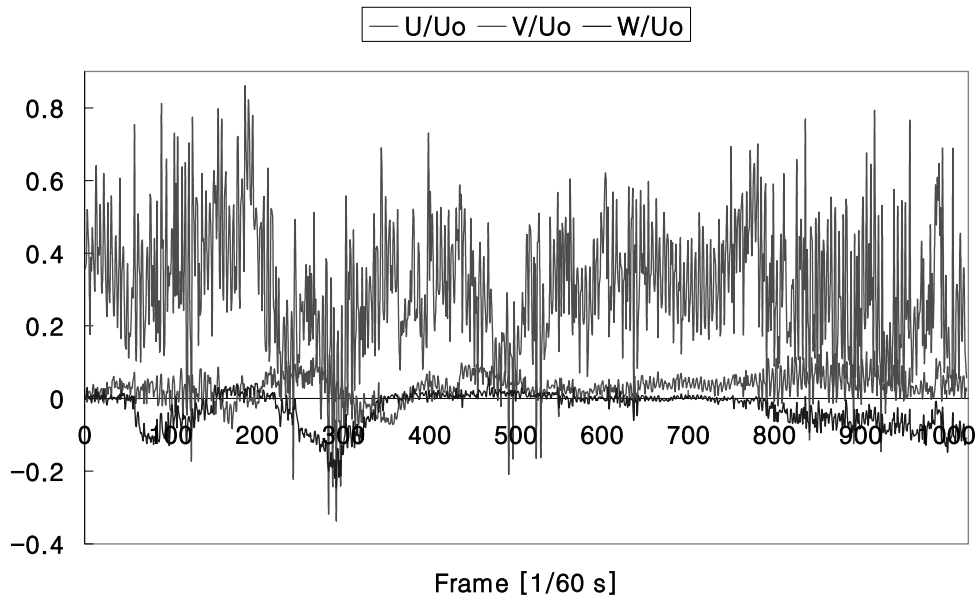
(a) xy Section at $x/D=2.31$, $y/D=0.29$



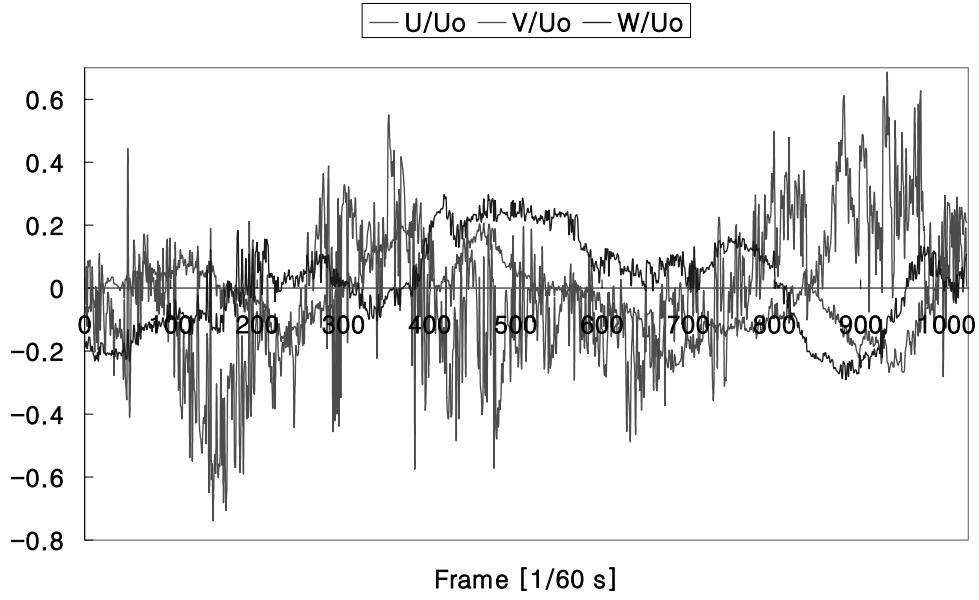
(b) xy Section at $x/D=2.99$, $y/D=0.70$



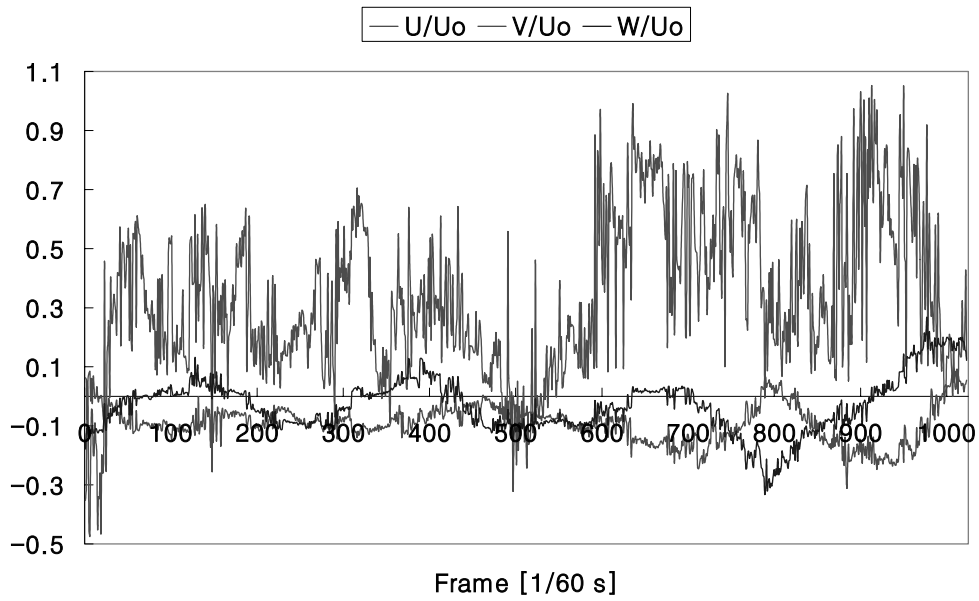
(c) yz Section at $y/D=0.02$, $z/D=0.02$ ($x/D=1.0$)



(d) yz Section at $y/D=0.49$, $z/D=0.02$ ($x/D=1.0$)

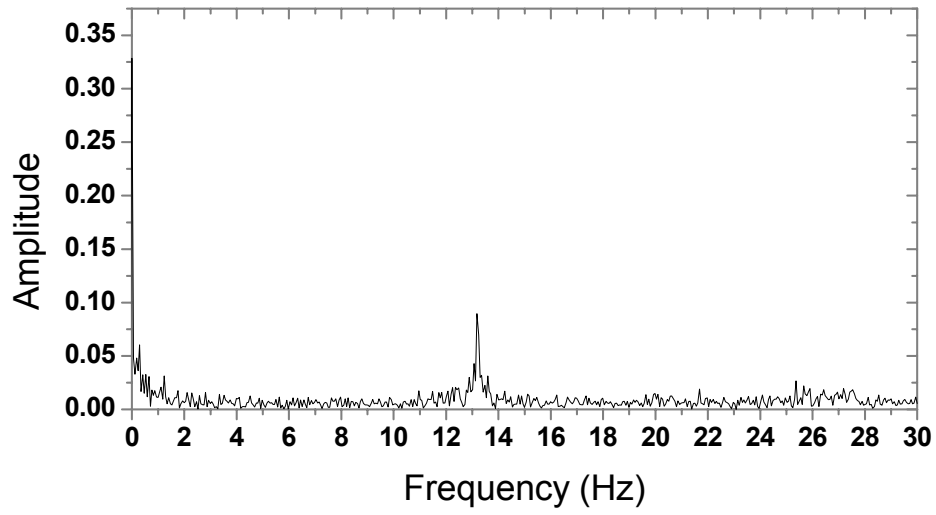


(e) yz Section at $y/D=0.02$, $z/D=0.02$ ($x/D=2.5$)

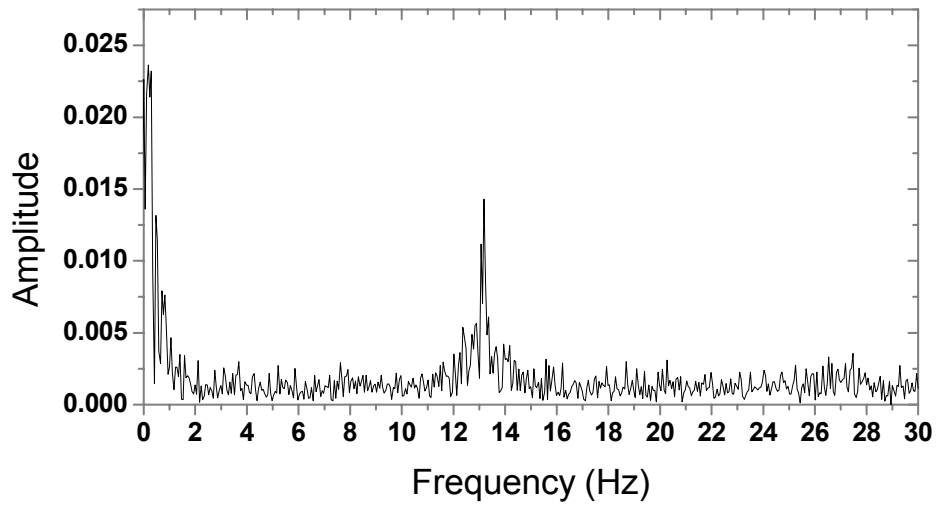


(f) yz Section at $y/D=0.49$, $z/D=0.02$ ($x/D=2.5$)

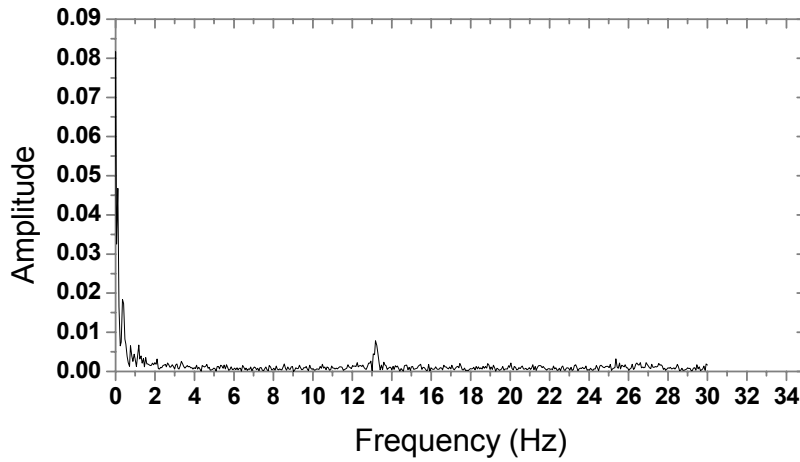
Fig. 4.29 Time history at each section.



(a) U component of yz section at $y/D=0.02$, $z/D=0.02$ ($x/D=1.0$)



(b) V component of yz section at $y/D=0.02$, $z/D=0.02$ ($x/D=1.0$)



(c) W component of yz section at $y/D=0.02$, $z/D=0.02$ ($x/D=1.0$)

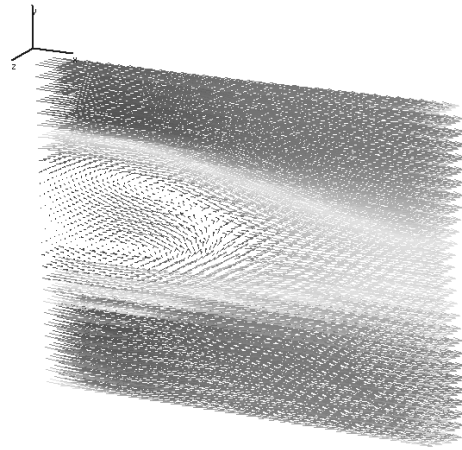
Fig. 4.30 Result of FFT analysis for SPIV.

4.3.3 스테레오 PTV 측정결과

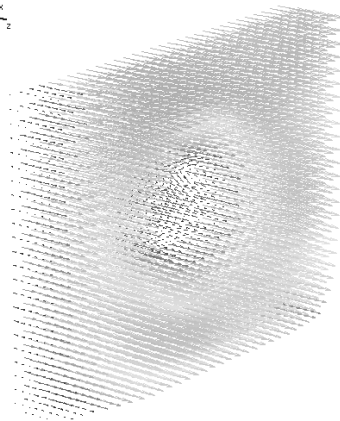
SPTV의 경우 SPIV와 달리 광원의 폭에 존재하는 속도성분을 함께 검출할 수 있는 특징이 있다. 반면에 광원의 영향을 받게 되며, 실험영상에서 입자를 추적하게 되므로, 실제 입자 추종에 의한 유효벡터가 SPIV보다 작았다. 이는 본 실험에서 SPIV 및 SPTV를 동일한 영상을 이용하여 처리한 결과이기 때문이며, 실제 SPTV에 맞는 용도의 실험을 행한다면 SPTV도 SPIV와 유사한 유효벡터를 획득할 수 있다.

Fig. 4.31은 SPTV의 결과 중 평균속도장을 나타낸 것으로 SPIV는 단면에서 W속도성분만을 검출할 수 있는 2차원-3속도성분(2D-3C)을 검출하며,

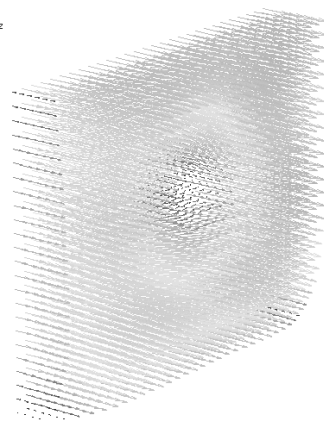
SPTV는 광원내의 입자를 추종하므로 3차원-3속도성분(3D-3C)을 검출한다. 따라서 이들 결과간의 결과를 비교하기 위하여 SPTV의 결과중 중앙단면에 대한 벡터를 추출하여 SPIV와 비교하고자 하였다.



(a) xy section.



(c) $x/D=1.0$ of yz section



(e) $x/D=2.5$ of yz section.

Fig. 4.31 Mean velocity distribution of SPTV at each section.

4.3.3.1 평균 유동장 해석

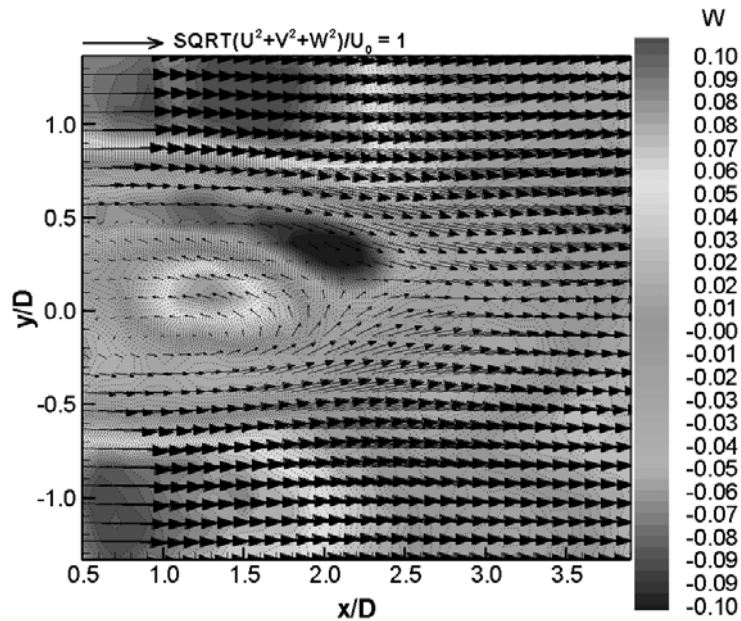
Fig. 4.32은 SPIV의 결과와 상대적인 비교를 위하여 SPTV의 결과 중 중앙단면의 벡터들을 추출한 구 후면의 각 단면에 대한 속도분포를 나타낸 것으로 (a)~(c)는 xy 단면, (d)~(f)는 $x/D=1.0$ 에서의 yz 단면과 (g)~(i)는 $x/D=2.5$ 에서의 yz 단면을 각각 속도분포 및 유선(streamline)으로 표현하였다.

Fig. 4.32 (c)는 SPIV에서의 xy 단면에서와 같이 SPTV의 xy 단면에서도 2개의 초점과 1개의 안장점을 갖고 있으며, 초점과 안장점의 위치는 SPIV와 약간의 차이가 있었으나, 이는 SPTV의 경우는 격자상에 배치를 시키기 위한 보간과정이 필요한데, 보간에 기인한 차이로 사료된다. F1은 $x/D=1.48$, $y/D=0.41$, $z/D=0.00$, F2는 $x/D=1.11$, $y/D=-0.15$, $z/D=0.00$, S는 $x/D=x/D=1.99$, $y/D=0.22$, $z/D=0.00$ 인 위치에 존재한다. SPIV와 마찬가지로 2개의 초점은 구 후면에 생성되는 부압에 의해 외부유동이 구 후면으로 유입되어 형성되는 것으로, S자 형태를 이루며 상.하부에 각각 1개씩 존재하며 서로 반대 방향으로 나선 운동을 하며 초점을 이룬다. 또한 안장점 S는 두 초점과 외부에서 유입되는 유동에 의해서 늘어나거나 줄어들며 이에 의해 F1의 위치도 시간이 지남에 아치형태를 이루는 경로를 따라 이동한다.

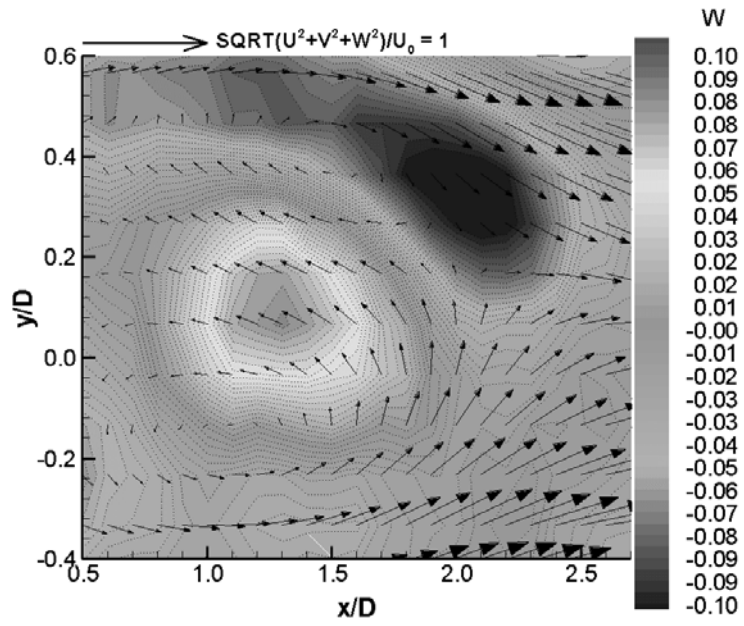
Fig. 4.32 (f)역시 SPIV에서의 xy 단면과 유사한 형태를 보이나, $x/D=1.0$ 에서의 yz 단면에 대한 유선으로 외부에서 역류해 들어오는 유동에 의해서 이 유동을 중심으로 좌.우에 각각 1개의 초점과 1개의 노드를 갖고 있으며,

F는 $x/D=-0.15$, $y/D=-0.28$, $z/D=-0.00$, N은 $x/D=0.53$, $y/D=-0.19$, $z/D=0.00$ 에 각각 위치한다. 또한 2개의 안장점을 갖고 있으며, 이들의 위치는 S1은 $x/D=-0.45$, $y/D=-0.06$, $z/D=0.00$, S2는 $x/D=0.69$, $y/D=0.19$, $z/D=0.00$ 이다.

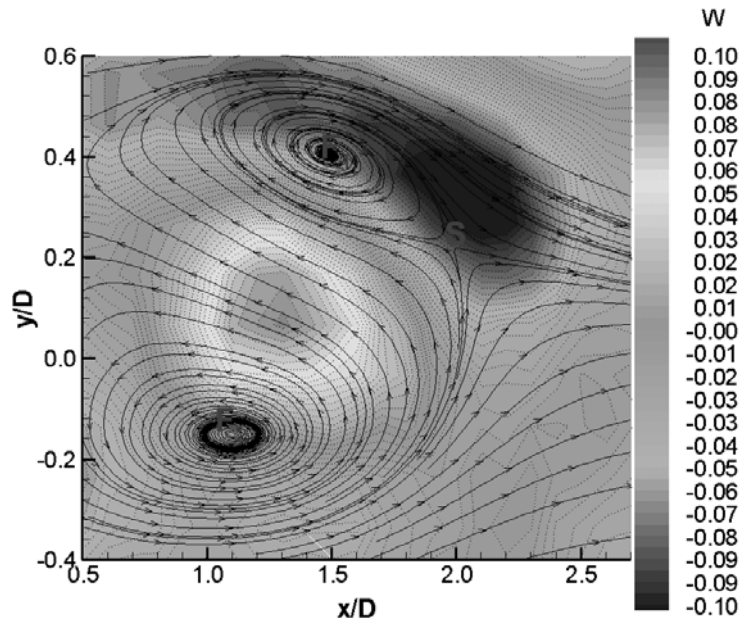
Fig. 4.32 (i)는 $x/D=2.5$ 인 지점에서의 yz 단면에 대한 유선으로써, 구 후면의 영향은 다소 줄어들었으나, 구 후면에서의 부압의 영향으로 외부 속도 보다는 실속이 이루어지고 있으며, $x/D=1.0$ 인 지점에 비해 구 후면의 부압의 영향이 작으므로 초점이나 안장점을 형성하지 못하고 SPIV와 마찬가지로 노드를 형성한다. 이 때 노드의 위치는 다음과 같다. 노드 N은 $x/D=-0.07$, $y/D=0.25$, $z/D=0.00$ 이다.



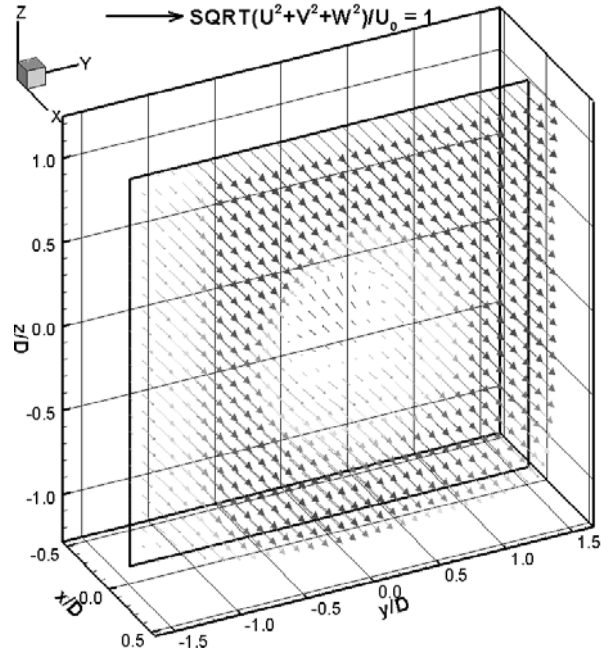
(a) Mean vectors at xy section



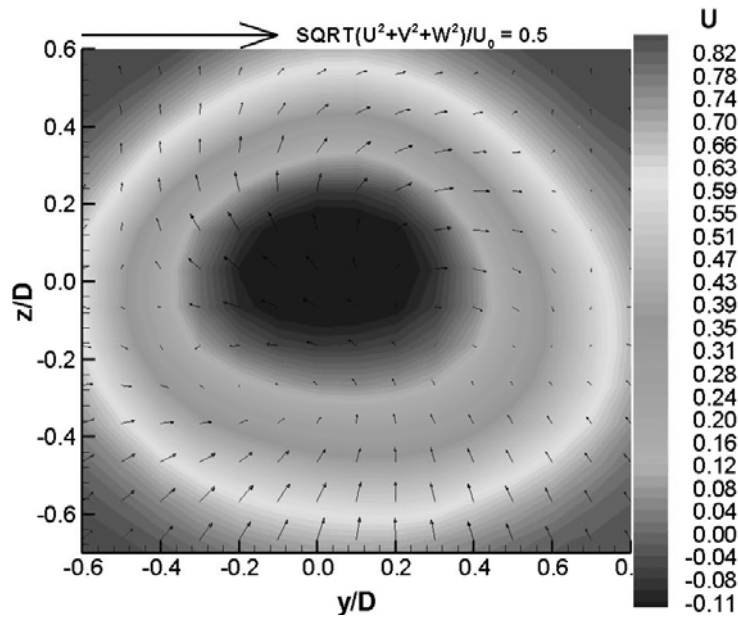
(b) Magnification of mean vectors at xy section



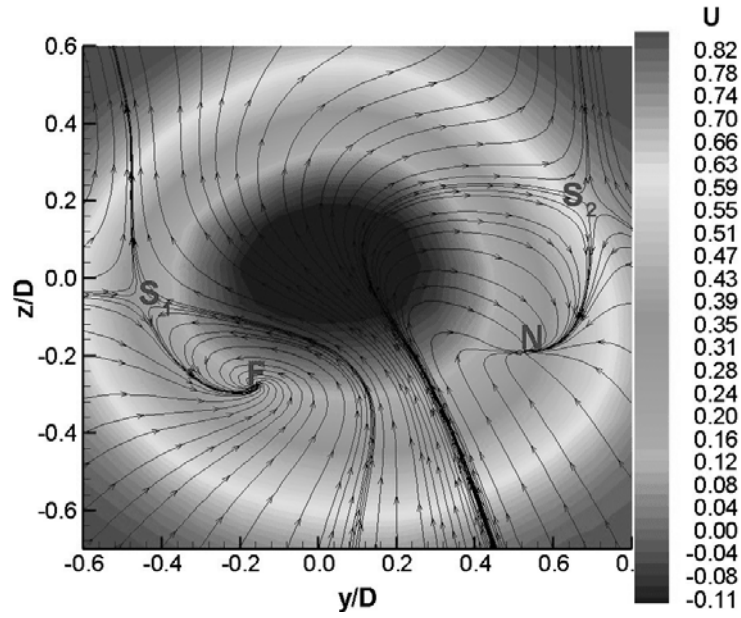
(c) Stream line with W component at xy section



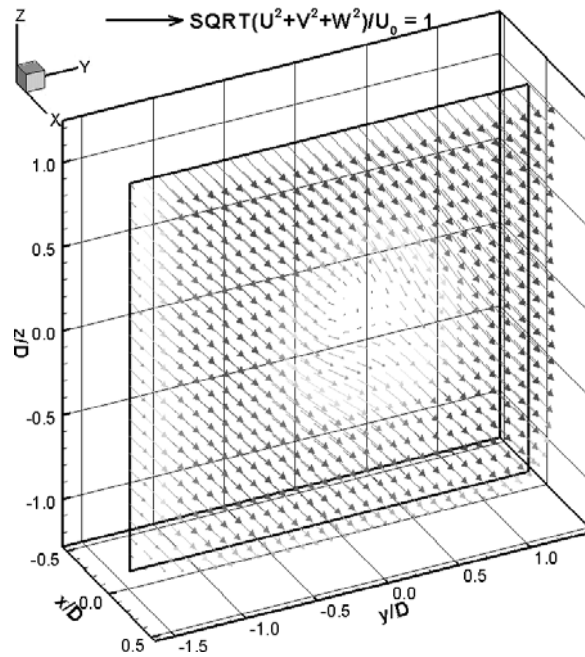
(d) Mean vectors of volume distribution at $x/D=1.0$ of yz section



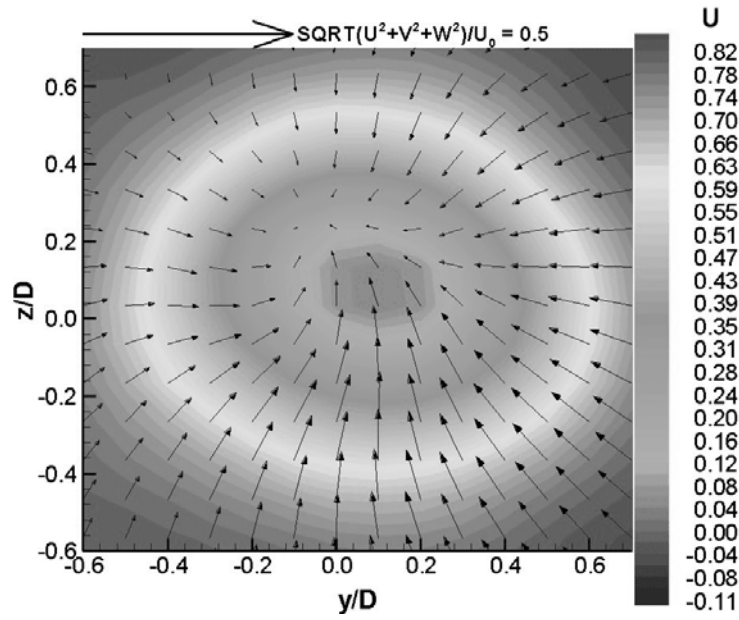
(e) Magnification of mean vectors at $x/D=1.0$ of yz section



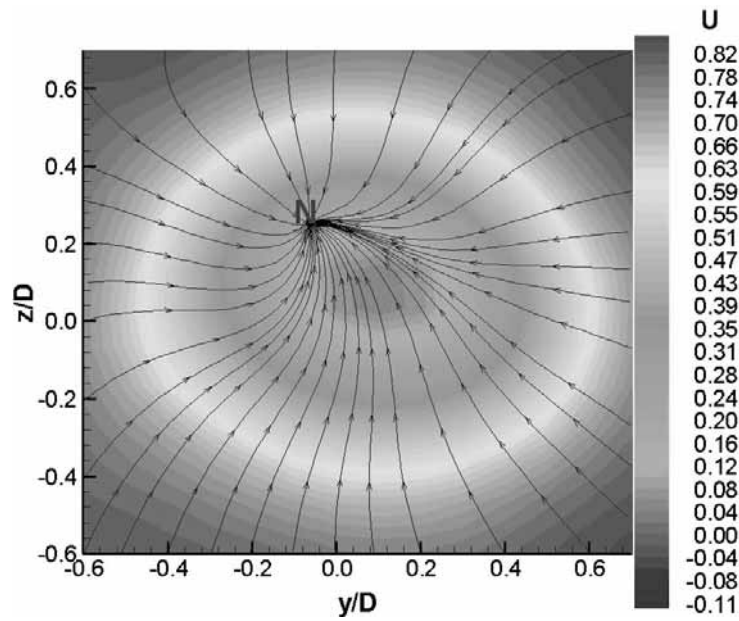
(f) Stream line with U component at $x/D=1.0$ of yz section



(g) Mean vectors of volume distribution at $x/D=2.5$ of yz section



(h) Magnification of mean vectors at $x/D=2.5$ of yz section



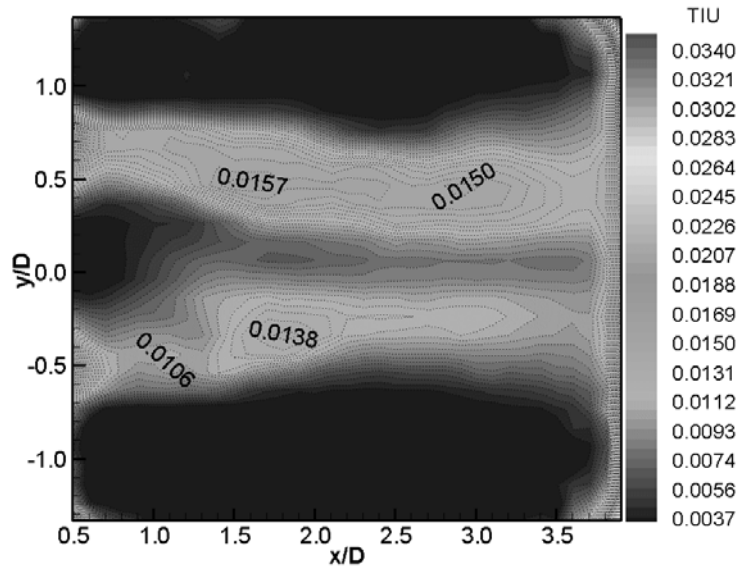
(i) Stream line with U component at $x/D=2.5$ of yz section

Fig. 4.32 Velocity distribution of SPTV at each section.

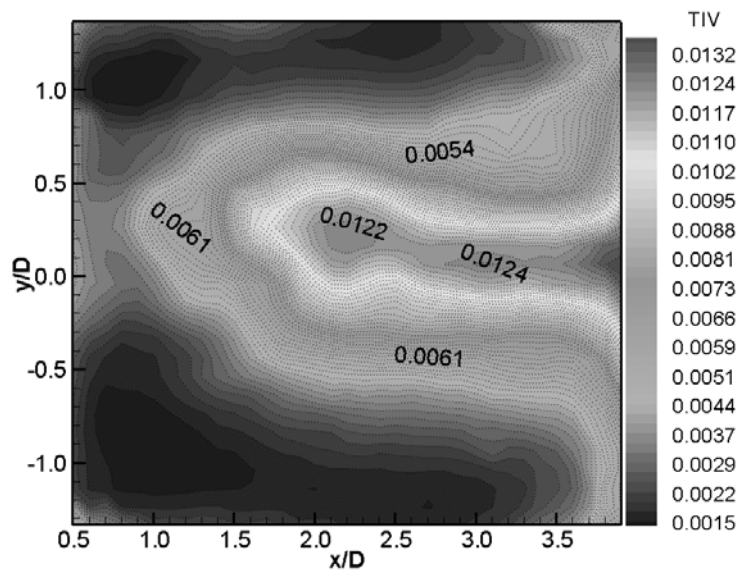
4.3.3.2 평균 물리량 해석

SPIV와 달리 SPTV의 경우 가상영상을 이용한 알고리즘 검증시에는 SPIV보다 SPTV가 물리량의 측정이 정확하였으나, 실제 실험 결과 Fig. 4.33에서의 결과가 SPIV의 결과 보다 상대적으로 좋지 못한 것을 확인할 수 있다. TIU의 경우는 구 후류의 특징을 정확하게 잡아내지 못하고 있으며, TIV의 경우는 SPIV의 TIV분포와 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 RUV역시 SPIV의 난류응력 UV성분과 유사한 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있는데, 이는 SPTV의 경우 SPIV 결과와 비교를 하기 위하여 SPTV 정보중 중앙단면에 해당하는 벡터만 추출하여 사용하였기 때문에 해당 단면에서의 유효벡터수가 SPIV보다 작았음에 기인한다고 사료된다. (b)의 TIV와 (c)의 RUV는 SPIV의 결과에 근접함을 확인할 수 있었다.

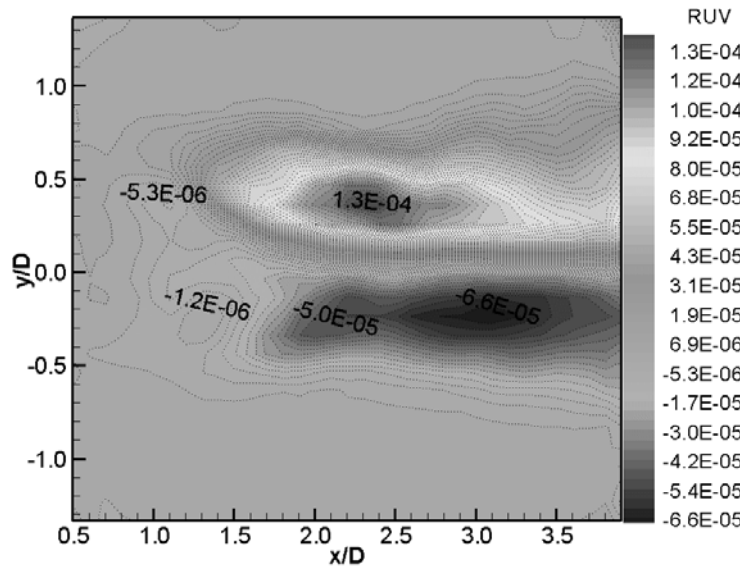
Fig. 4.34와 Fig. 4.35은 yz 단면인 $x/D=1.0$ 과 $x/D=2.5$ 에서의 물리량들을 나타낸 것으로 이들의 물리량을 정확하게 표현하지 못함을 확인할 수 있다. 이는 평균속도장을 살펴보면 그 원인을 바로 확인할 수 있다. 즉 상기 기술된 바와 같이 유효벡터의 수가 상대적으로 줄어들었으며, 이 벡터정보들을 기반으로 구해지는 물리량에도 상당한 영향이 미치는 것으로 사료된다.



(a) Turbulent Intensity of U component

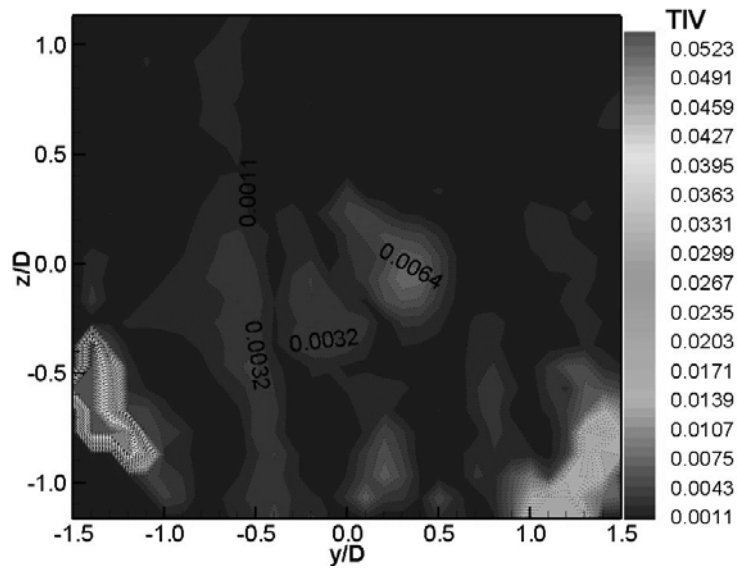


(b) Turbulent Intensity of V component

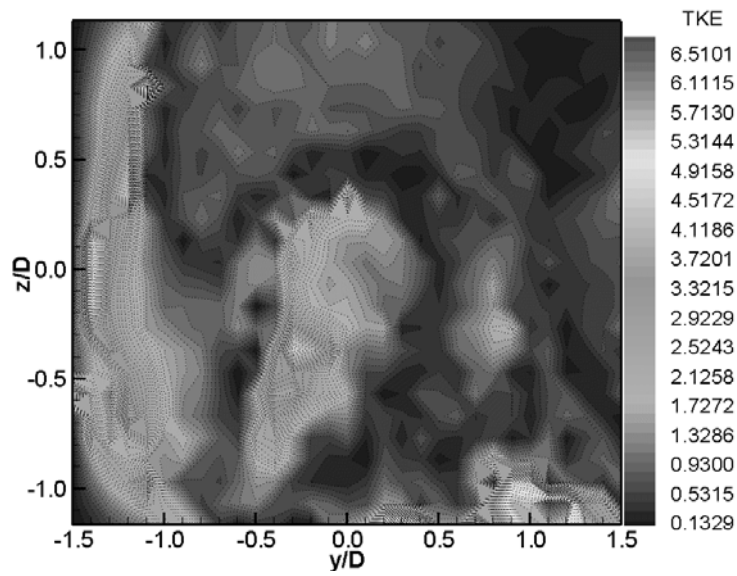


(c) Reynolds stresses of UV component.

Fig. 4.33 Physical quantity of SPTV at xy section.

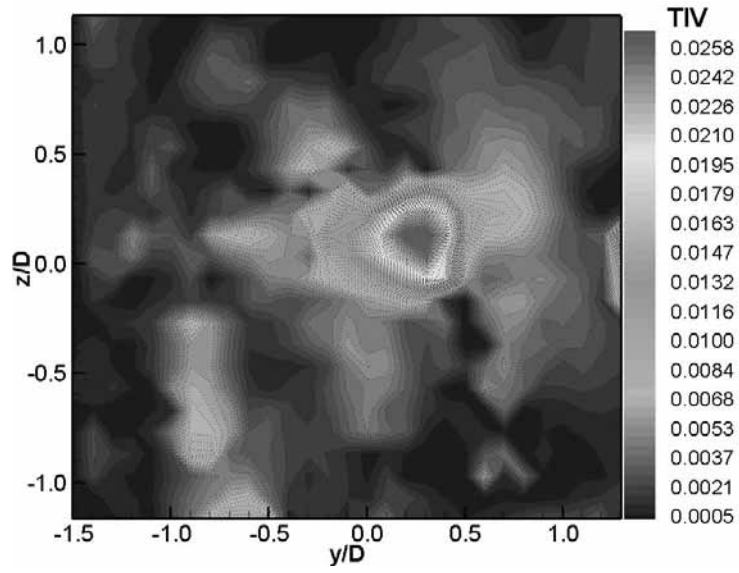


(a) Turbulent Intensity of V component

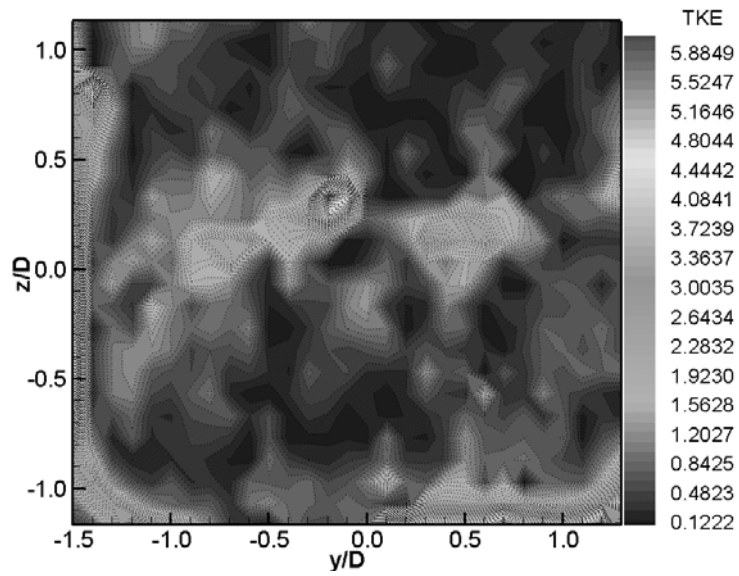


(b) Turbulent Kinetic Energy

Fig. 4.34 Physical quantity of SPIV at yz section. ($x/D=1.0$)



(a) Turbulent Intensity of V component



(b) Turbulent Kinetic Energy

Fig. 4.35 Physical quantity of SPIV at yz section. ($x/D=2.5$)

4.3.3.3 순시 유동장 해석 및 유동구조 분석

Fig. 4.36은 각 단면에 대한 시간 추이를 위한 샘플링 포인트를 표시한 것으로 (a)는 yz 단면에 대해 A, B에 대해서 데이터를 획득하였으며, (b)는 zx 단면에 대해 A, B에 대해서 데이터를 획득하였다. (a)의 A는 $x/D=2.30$, $y/D=0.27$ 인 점과 B는 $x/D=3.00$ $y/D=0.67$ 인 점으로 하였으며 (b)의 A는 $y/D=0.00$ $z/D=0.03$ 인 점과 B는 $y/D=0.50$ $z/D=0.03$ 인 점에 대해서 x/D 에 따라 각각 그래프로 나타내었다.

Fig. 4.37은 샘플링 포인트에서 추출된 무차원 속도를 그래프로 나타낸 것으로, (a)는 3 성분이 거의 일정한 주기가 있음을 나타내고 있다. Fig. 4.37 (b)의 경우는 특정 순간에만 급속한 유속의 변화가 생김을 시사하고 있다. 즉 SPTV에서도 SPIV와 유사하게 218번째 프레임과 489번째 프레임에서 급속한 유속의 변화가 생겼다. Fig. 4.37 (c)와 (d)는 $x/D=1.0$ 일 때, (e)와 (f)는 $x/D=2.5$ 일 때의 yz 단면에서의 유속변화를 해당 샘플링 포인트에서 유속의 변화를 나타낸 것으로, 특히 (c)의 경우는 이들 무차원 속도값에 대하여 FFT 변환을 해본 결과 Fig. 4.38 (a), (b), (c) 모두 13.18Hz라는 공통된 특성주파수를 나타내었다. SPIV 결과에서 추론하였듯이 yz 단면상에서 구 후면의 유동주파수 즉 외부에서 구 후면으로 유입되어 들어오는 주기가 13Hz 정도임을 시사한다. 이러한 결과는 선행 수행되어진 SPIV의 결과와 일치함을 확인하였다. 즉, SPIV의 결과와 물리량을 비교하는 데 있어서는 상당한 차이를 보이고 있으나, 순시유동장에서는 특정 포인트에서의 검출되어지는 속도성분의 경우는 유효벡터 숫자엔 크게 영향을 받지 않음을

확인할 수 있다. 즉 SPIV와 SPTV에서 동일한 위치에 존재하는 속도벡터의 물리적 특징은 거의 유사함을 시사한다.

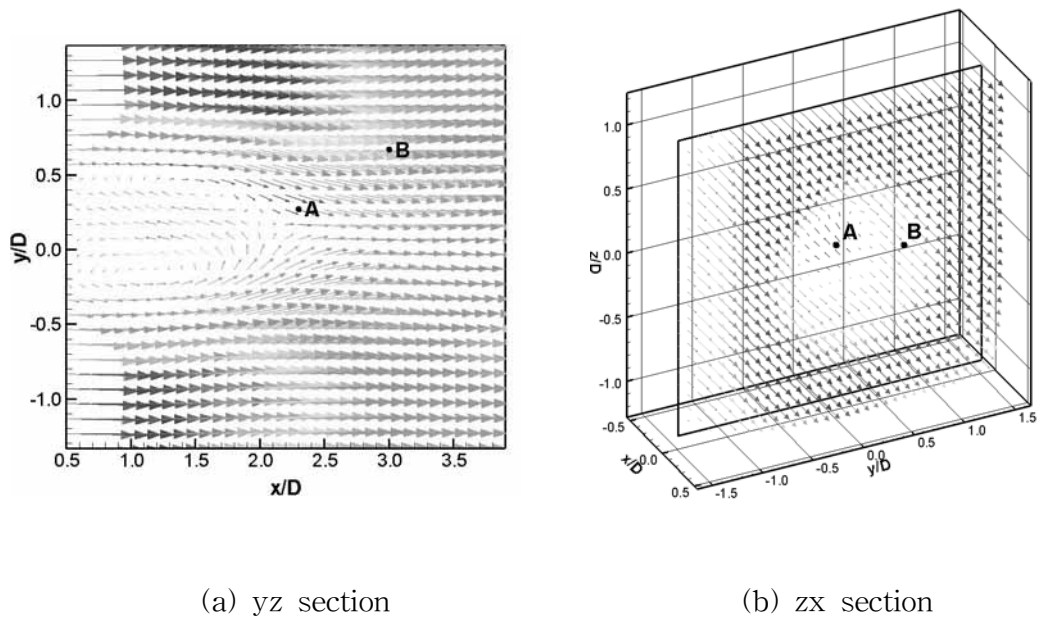
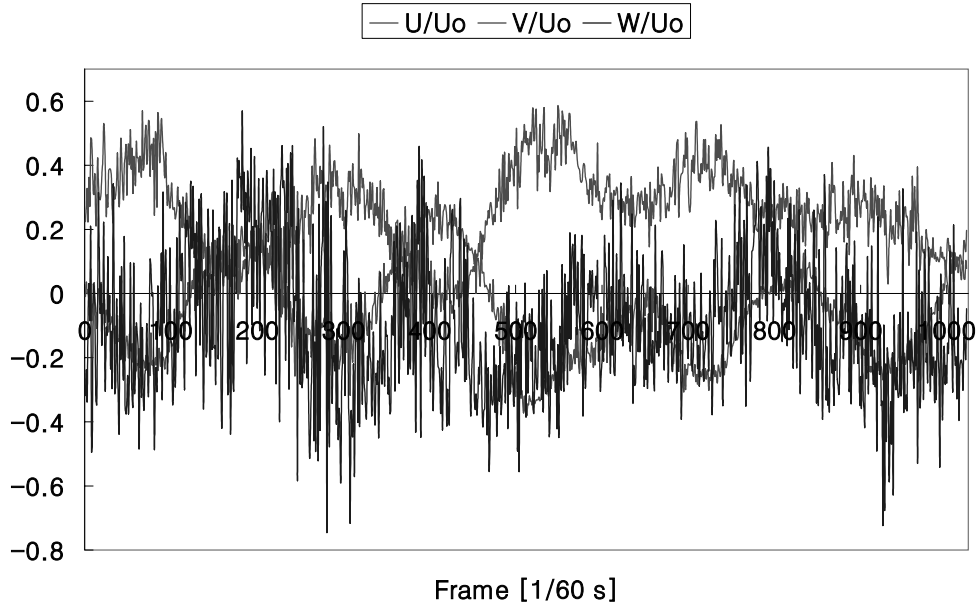
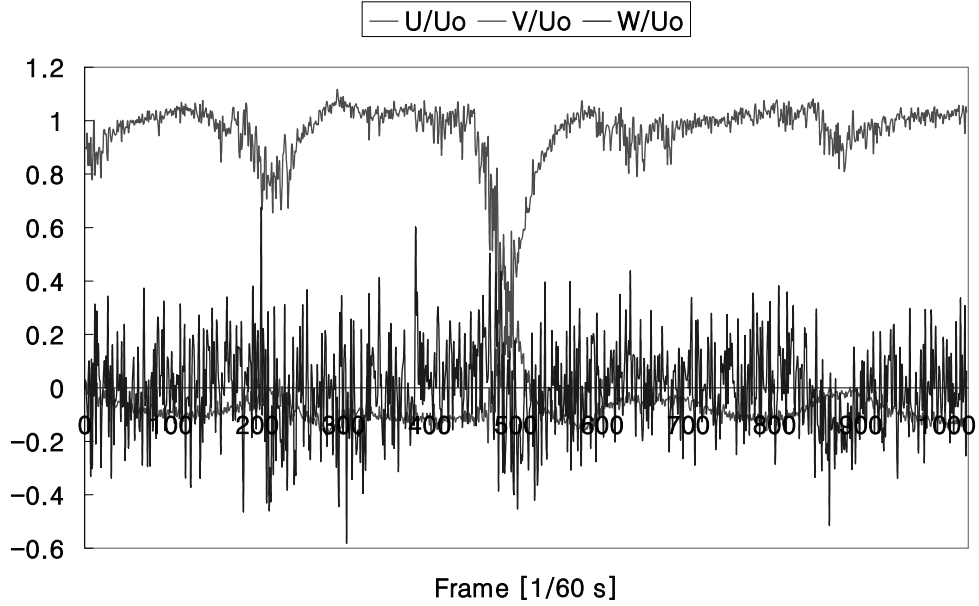


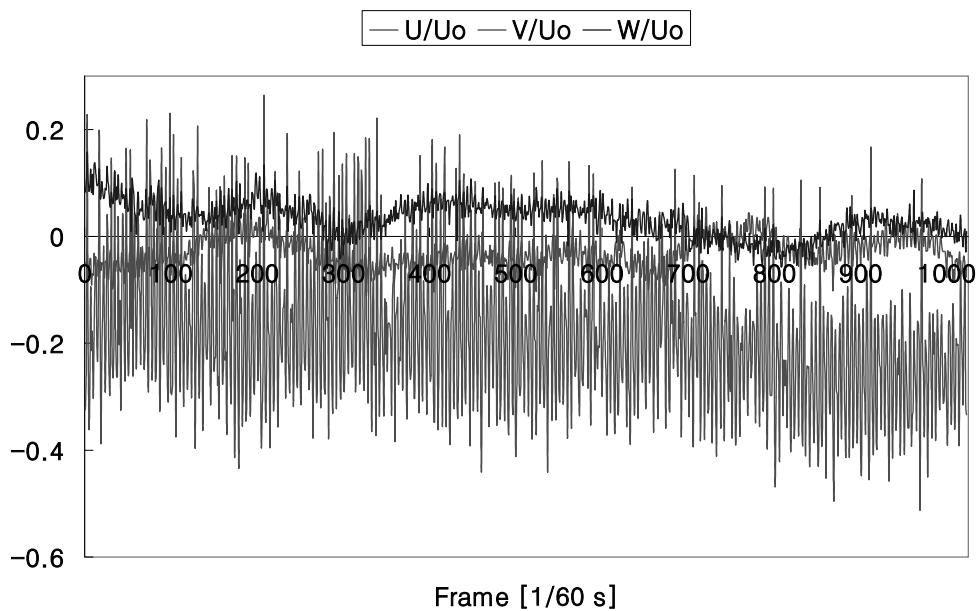
Fig. 4.36 Sampling point for time history.



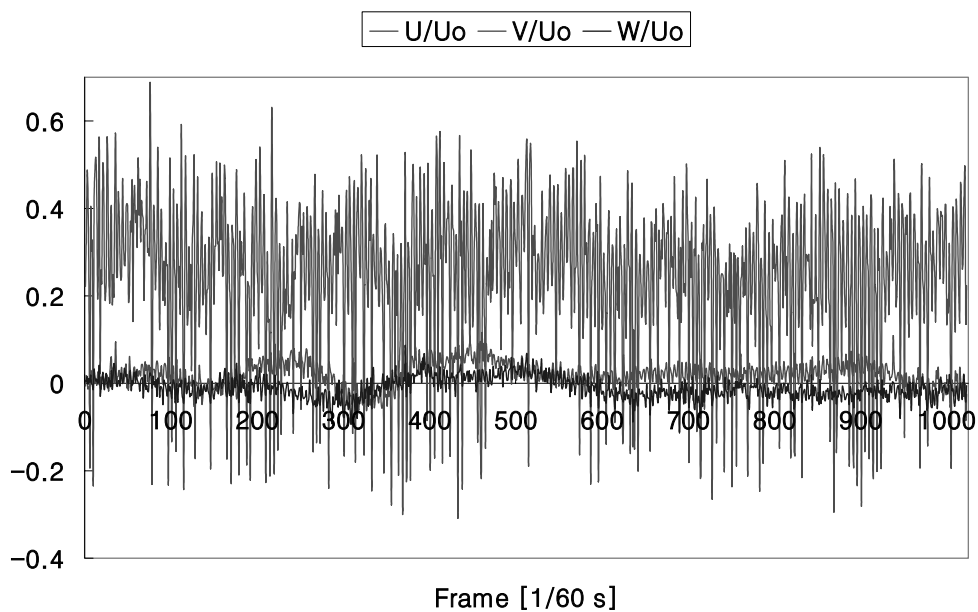
(a) xy Section at $x/D=2.30$, $y/D=0.27$.



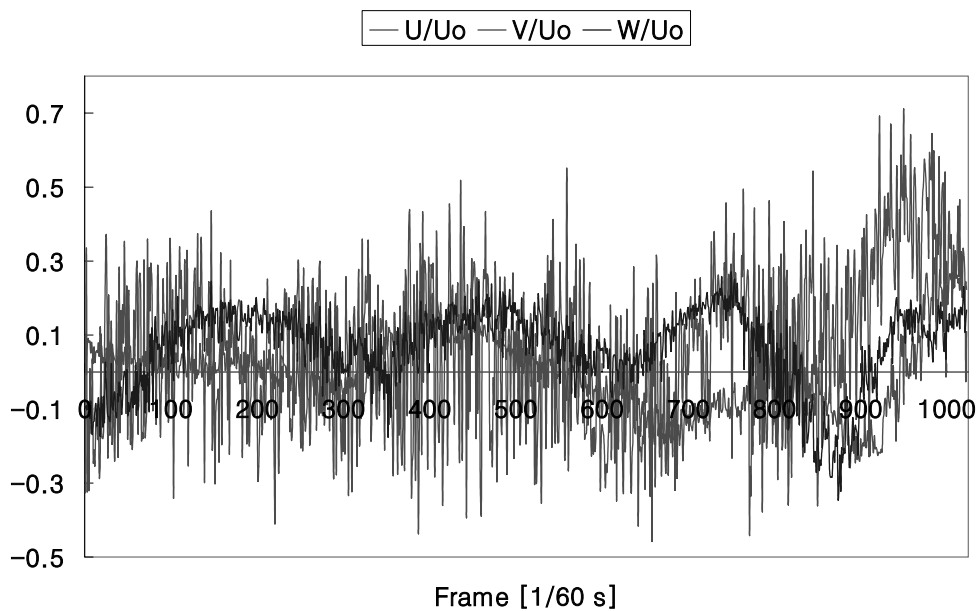
(b) xy Section at $x/D=3.00$, $y/D=0.67$.



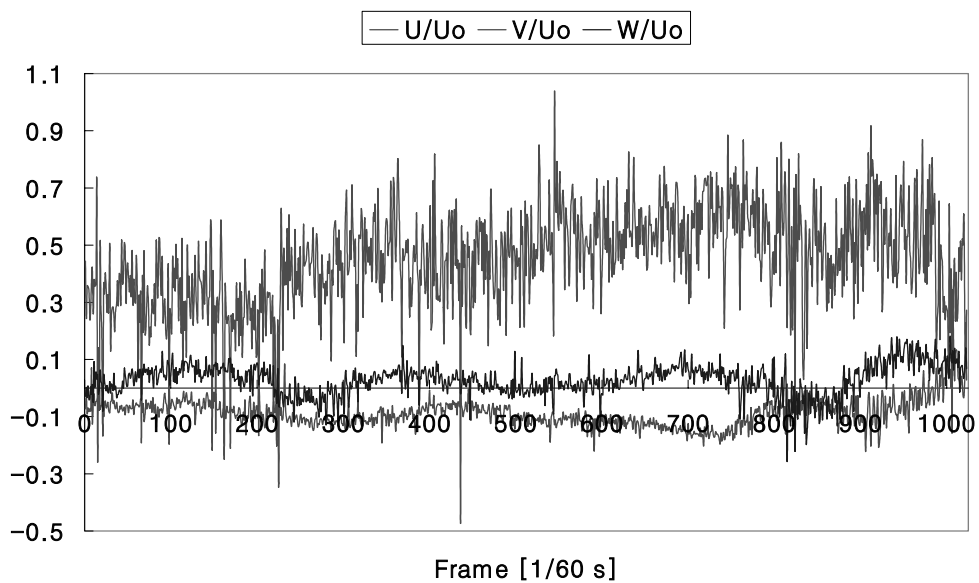
(c) yz Section at $y/D=0.00$ $z/D=0.03$ ($x/D=1.0$)



(d) yz Section at $y/D=0.50$, $z/D=0.03$ ($x/D=1.0$)

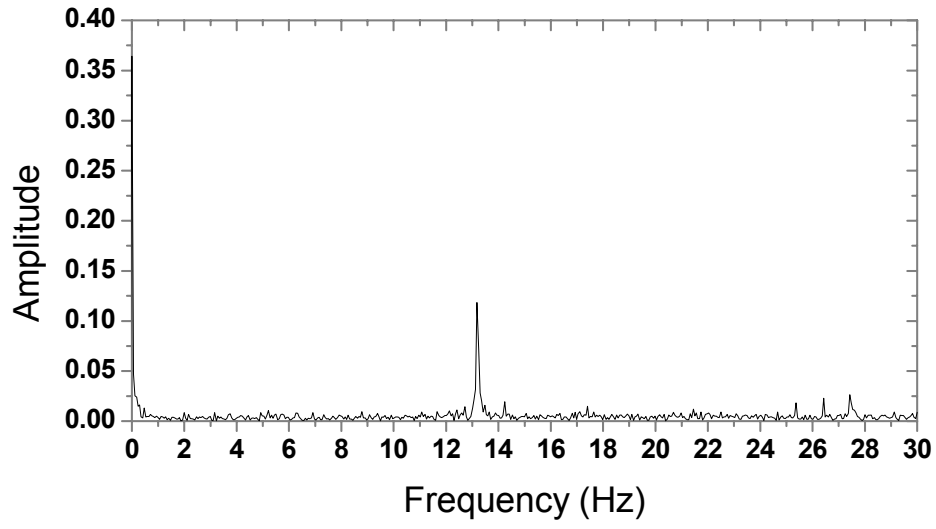


(e) yz Section at $y/D=0.00$, $z/D=0.03$ ($x/D=2.5$)

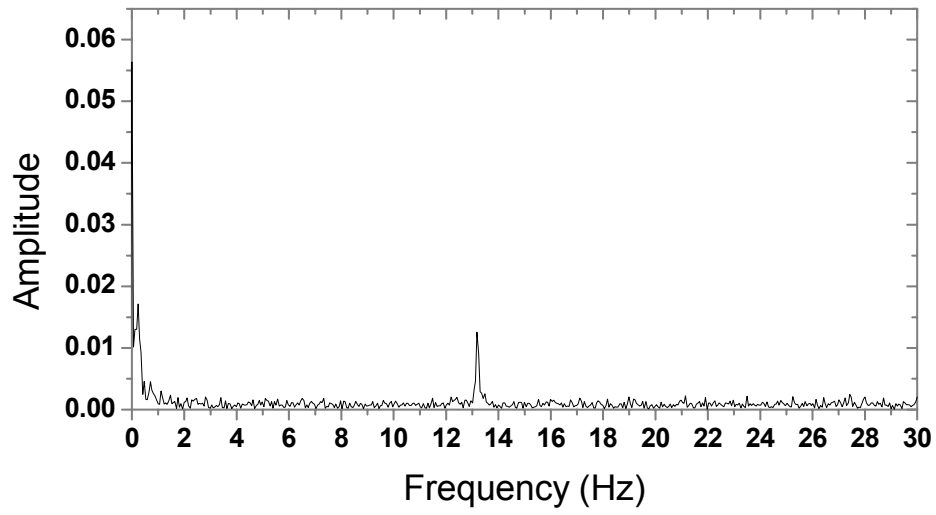


(f) yz Section at $y/D=0.50$, $z/D=0.03$ ($x/D=2.5$)

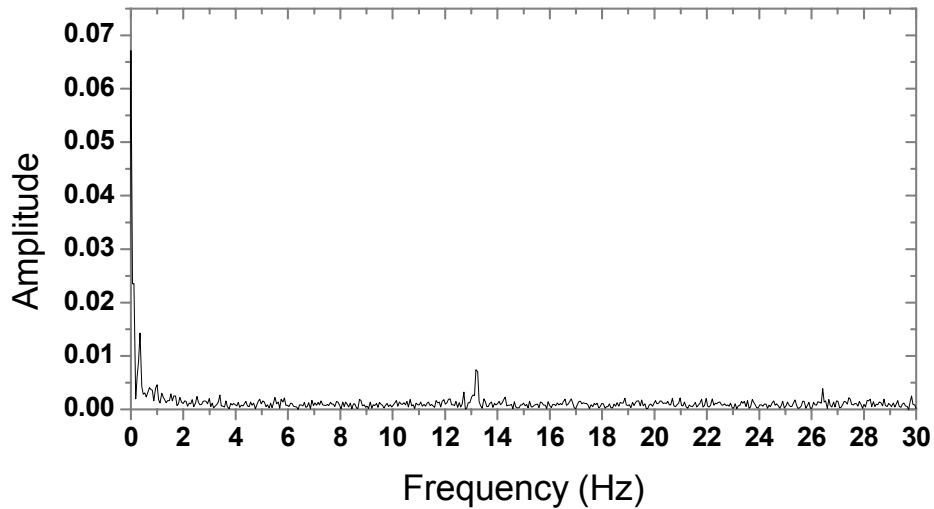
Fig. 4.37 Time history at each section.



(a) U component of yz section at $y/D=0.00$, $z/D=0.03$ ($x/D=1.0$)



(b) V component of yz section at $y/D=0.00$, $z/D=0.03$ ($x/D=1.0$)



(c) W component of yz section at $y/D=0.00$, $z/D=0.03$ ($x/D=1.0$)

Fig. 4.38 Result of FFT analysis for SPTV.

4.4 결론

1) 4D PTV 측정

4D PTV계측법을 이용하여 구의 후류에 대한 특성조사를 하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

고해상 4D PTV계측법을 이용하여 구의 후류에 대한 특성조사를 하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다. 구의 후류내부구조는 외부와구조 (outer vortical structure)와 내부와구조(inner vortical structure)로 구성되어 있음이 확인되었다. 이러한 구조는 기존의 연구에서는 내부셀(inner

shell)과 외부셀(outer shell)로 구분하고 있는데 이러한 구조가 고해상 4D PTV에 의하여 재구성될 수 있음을 확인하였다. 내부셀은 발생초기에는 Cone형상을 하다가 임의의 시기에서는 외부와구조에 의하여 S형으로 전환 되면서 결국은 내부셀로부터 외부셀의 바깥쪽으로 떨어져 나가는 현상이 나타났다. 구의 표면에서의 박리에 의하여 구 후류 부에 압력저하에 따른 역류발생으로 특정구간에서 $-U/U_0$ 가 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 외부셀인 와환(vortex loop)은 시계방향 혹은 반시계 방향으로 회전하면서 하류 방향으로 대류되어 갔다. 헤어 핀(hair pin)형상의 내부 셀의 와구조는 주기적으로 수평으로 의 회전이 관찰되었다. 한편, 헤어핀(hair pin) 모양의 내부 셀의 와구조는 때로는 수평의 쌍으로 나타났다가 때로는 수직의 쌍으로 나타났다. 이는 선행 연구자들의 수치해석결과와도 일치하는 사항이다. 구 후류 내부와 외부 유동에서의 유속의 큰 차이 즉 내부 외부 셀 사이에 내재하는 강한 전단층이 이중 셀 구조를 일으키는 가장 큰 인자로 사료된다.

구 후류에 대한 4D PTV에 의한 여러 가지 측정물리량들은 기존의 연구 성과들과 잘 일치하였다.

2) SPIV/SPTV

스테레오 PIV와 스테레오 PTV로 구의 후류측정 결과로부터 다음과 같은 결론으로 정리할 수 있었다.

SPIV측정법은 SPTV측정법보다 구의 유동현상을 잘 대변하고 있음이 확인되었다. 이론상으로는 SPTV가 SPIV보다 난류운동에 대하여 보다 정교하게 측정이 가능하다고 알려져 있으나⁽¹⁰⁾ SPTV측정법의 실질적 적용에 있

어서 카메라해상도의 제약과 입자투입밀도의 물리적 한계, 불규칙으로 분포되어 있는 속도벡터의 격자상 보간에 있어서 발생하는 보간 오차 등의 문제로 공간해상도가 SPIV보다 떨어지게 되는 단점이 있지만 이들을 근본적으로 해결할 수 있는 것은 고속고해상의 카메라를 사용함으로써 해결될 수 있는 문제로 사료된다.

구의 후류에는 이중와구조(inner shell와 outer shell)가 있음이 확인되었으며 내부와구조는 S형운동을 하고 있음이 실험결과영상으로부터 확인되었다. 내부 shell은 하류측에서는 축소되는 경향을 보이지만 외부 shell은 확대되는 경향을 보이고 있음이 확인되었다. 측정된 물리량들은 기존의 연구 성과들과 잘 일치함이 확인되었다.

제 5 장 Impinged Jet 유동 해석

5. 1 연구배경

일반적으로 제트유동은 표면 냉각, 가열 혹은 건조에 사용되어지는 전기 장치, 종이생산, 유리생산, 고온의 가스터빈, 방빙시스템(anti-icing system)을 포함하는 폭넓고 다양한 산업공정에 적용되기 때문에 여전히 지금까지 큰 관심의 대상이 되고 있다.

충돌제트(Impinged jet) 작용에 대한 2개의 실험적 연구들은 유동장의 평균특성들을 확립하기 위하여 Donaldson 등⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾에 의해서 수행되어졌다. 그들의 측정은 일일이 표면압력분포, 반경방향과 축방향 속도 요동(fluctuation)과 자유 혹은 충돌제트일 경우 주파수역을 포함했다.

열전달의 측정은 노즐출구직경, 판에 이르는 노즐간 거리 및 유동율(flow rate)의 영향을 고려한 Gardon 등⁽⁵⁵⁾에 의해서 수행되어졌다. 후에 Gardon 등⁽⁵⁶⁾은 열전달 측정에서 난류의 역할을 설명하였다. 많은 연구들이 제트가 주위의 유체(ambient fluid)와 같은 동일한 온도를 갖거나 혹은 그렇지 않다는 것을 수반해 왔고, 열적 동반(thermal entrainment)효과 설명해왔다. 이와 관련하여, Striegl 등⁽⁵⁷⁾은 단일 난류 평판 제트(single turbulent plane jet)의 경우에 대한 해석적 모델을 개발하였다. 후에, Goldstein 등⁽⁵⁸⁾은 실험적인 테스트를 수행하였고 대류열전달계수는 제트와 주위사이의 온도차에 독립적임을 발견된 동안에 그것은 가열벽 온도와 단열벽 온도 사이의 차로

정의되었다⁽⁵⁹⁾.

평판에 충돌하는 순환워터제트(Circular water jet)의 속도장은 Landreth 등⁽⁶⁰⁾에 의해서 PIV로 측정되어졌다. Nishino 등⁽⁶¹⁾은 워터제트의 정체점에서 난류통계를 측정하기 위하여 PTV를 대신 사용하였다. 이들 선행연구자들의 연구는 시간해상도의 한계도 존재하였다. 시간해상도의 한계를 극복하고자 Nishino 등⁽⁶²⁾은 High-Speed PIV(HS-PIV)를 이용한 물속에 잠긴 순환충돌제트에 대한 실험을 수행하였다. 그는 HS-PIV 시스템의 자세한 설명과 순환충돌제트를 측정한 몇 가지 결과들로 난류유동을 위한 새로운 유속 측정기로써 HS-PIV의 강점을 설명하고자 하였다.

그러나 2차원 제트유동의 실험에 대한 해석으로써 실제 3차원 유동을 지니는 제트유동의 완벽한 재현에는 한계가 있었으며, 이를 극복하기 위한 높은 공간해상도와 높은 시간해상도를 갖는 4D PTV의 필요성을 다시 한번 일깨우게 된다. Hwang 등⁽¹⁸⁾은 4D PTV를 이용하여 충돌제트의 3차원 유동가시화를 수행하였다.

본 장에서는 구축되어진 4D PTV를 이용하여 순환충돌제트의 유동장을 3차원적으로 재현해보고자 한다.

5. 2 실험방법

Fig. 5.1 은 충돌분류측정을 위한 4D-PTV측정시스템의 실험개요도를 나타낸다. 노즐의 직경(D)은 20mm이며 직경대비 레이놀즈수는 40,000이다. 측정시스템은 고해상카메라 (1k x 1k, 2000fps), Nd-YAG 레이저(10mJ, 2000Hz), 호스트컴퓨터로 구성되어 있으며 동일한 시각의 영상을 받기 위하여 모든 시스템은 동기화 시켰다. 또한, 카메라 3대는 추적입자들에 대한 선명한 영상을 얻기 위하여 레이저광원에 대하여 전방산란이 되도록 설치하였다. 측정영역은 노즐출구와 충돌판 사이 약 (100mm x 100mm x 100mm)이다. 노즐출구는 평판으로부터 7D에 설치하였다.

측정의 기준점은 Fig. 5.1과 같이 노즐의 중심선상에 정의하였다. 측정알고리즘은 유전알고리즘기반의 3차원 PTV알고리즘⁽¹⁵⁾이다. 이 알고리즘은 순간에 얻어지는 속도벡터의 개수가 최대 7000개 이상으로 획득이 가능하므로 유동의 3차원 구조 및 난류통계량을 확보함에 있어서 타당성이 입증된 바 있다⁽¹⁵⁾. 4차원 입자영상유속계 시스템을 구현하기 위해서는 측정대상의 물리적 시간스케일보다 짧아야 하는 관계로 해석해야 할 영상수가 많은 점과 고해상으로 측정해야 하는 점으로부터 계산시간은 해상도의 멱승으로 증가하게 된다. 이를 극복하기 위하여 3차원 공간상에서 '측정영역 다분할 3D PTV 알고리즘'을 구축 하였다.

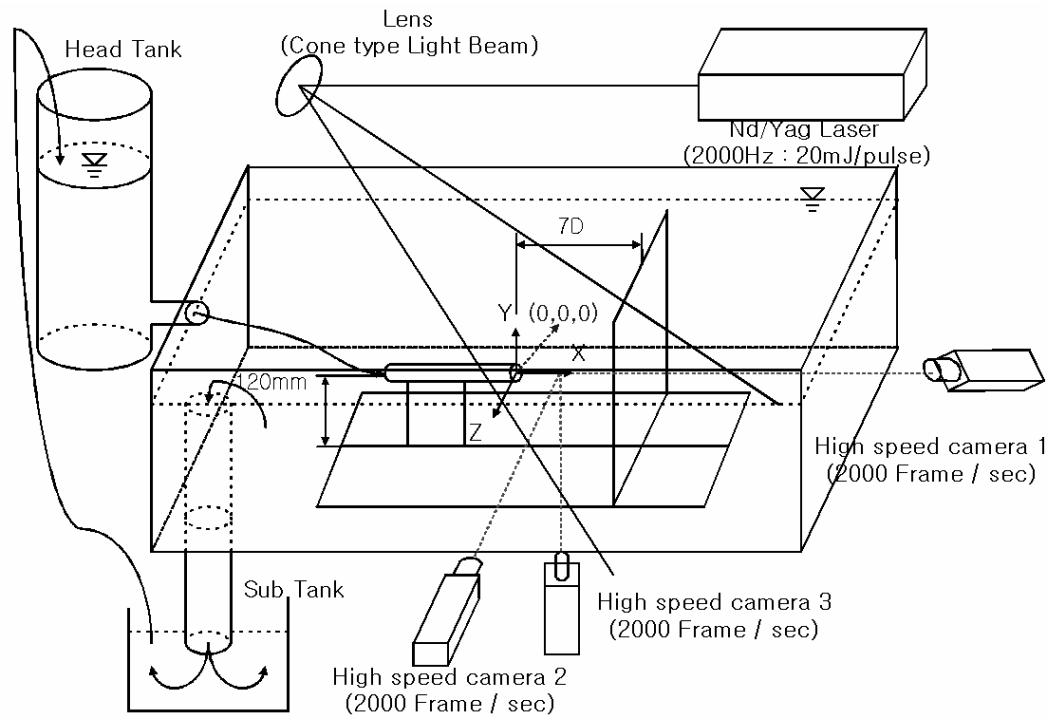


Fig. 5.1 4D PTV system for the impinged jet flow.

5. 3 실험결과

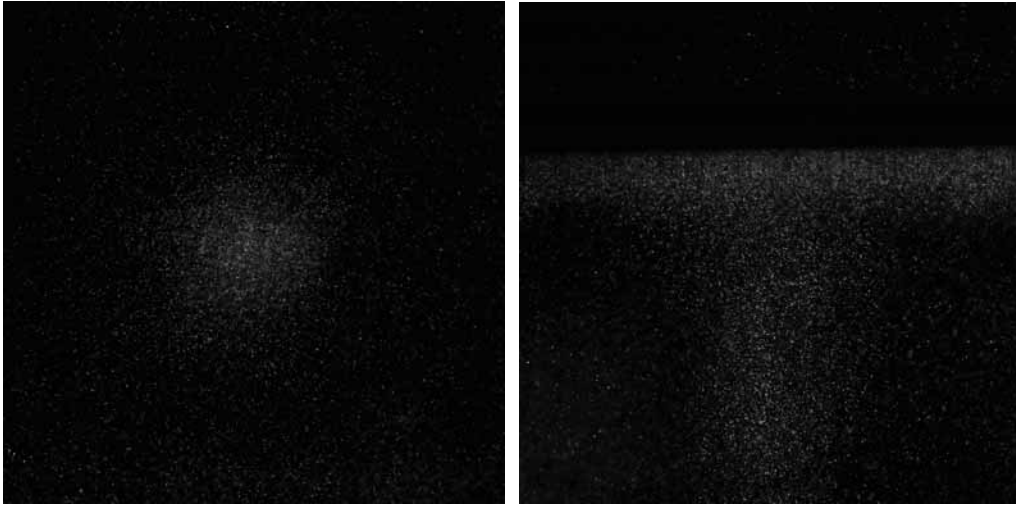
Fig. 5.2은 각 카메라에서의 순시 영상을 나타낸 것이다. 한 순간에 보이는 추적입자의 개수는 10000개~15000사이이다. Fig. 5.3는 본 연구에서 구축한 4D PTV 시스템으로 측정한 순간유동장의 속도벡터분포를 보이고 있으며 Fig. 5.4은 $x/D=6$, $y/D=-2.0$, $z/D=0.0$ 에서의 속도벡터의 각 성분의 시간이력을 나타내고 있다. 각 성분 모두 일정간격의 주기운동을 하고 있음이 보인다. U성분과 V성분은 크기가 비슷한 수준이며 속도 프로파일도 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만, W성분은 다른 성분에 비하여 미약한 것으로 보아 이 점에서는 상하방향으로의 주기운동이 발생하고 있음을 추론할 수 있다.

카메라 비디오 메모리의 한계(최대 2초 분량)로 인한 장시간 실험데이터의 확보는 하드웨어시스템의 제약조건에 의해 불가능하였으나 장시간에 걸친 반복된 가시화 실험으로부터는 와류유동의 불안정성에 기인하여 좌.우진동(z축 방향)이 확인되었는데 이는 회전형 섭동이 존재하는 것을 의미한다.

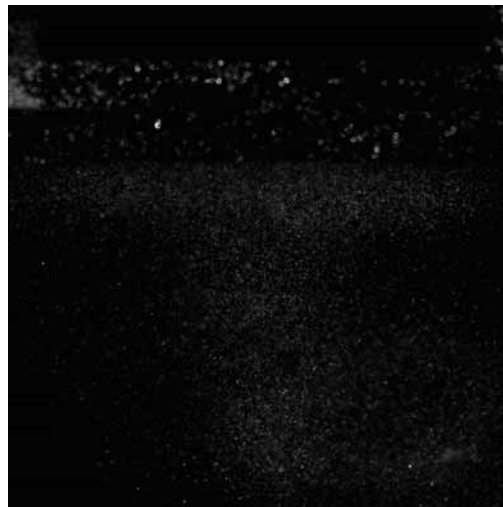
Fig. 5.5은 이를 바탕으로 하여 λ_2 의 값이 5%일 때의 와구조를 나타내는데 그림에서와 같이 특징적인 와구조가 존재함을 알 수 있었다. 이 와환(vertical loop)의 중심원은 충돌벽면으로부터 약 0.9D에 존재함이 확인되었다. 또한, 이 와환은 Fig. 5.6의 와도분포에 나타낸 바와 같이 시간에 따라서 시계방향으로 회전함이 확인되었으나 수차례에 걸쳐 얻어진 실험영상의 관

찰로부터는 반시계방향 회전도 확인되었다.

Fig. 5.7의 (a)와 (b)에 시간변화에 따른 λ_2 값 공간분포를 보이고 있다. 10msec 에서는 이 와환이 분리되어 몇 개의 조각으로 나뉘어 지나 20msec 에서는 다시 합쳐지고 있음이 확인되었다. 이와 같은 현상에 대하여는 기존의 측정방법(2D PIV, SPIV, 3D PTV 등)으로는 측정데이터로부터의 직접적 확인이 불가능하나 4D PTV는 직접적 확인이 가능하다는 강점을 지니고 있음을 확인할 수 있다. 또한, (b)에서 보이는 바와 같이 노즐의 상류측으로부터 노즐로부터 발생한 소규모 응집 와구조들이 충돌판을 향하고 있음을 알 수 있다. 이들 와구조는 충돌판에 부딪치는 상황에 따라서 Fig. 5.5와 같이 와환으로 성장할 수도 있으며 Fig. 5.7 (a) 및 (b)와 같이 와환으로 발전하지 못한 상태의 응집와구조로서 남아 있게 될 수 있는 것으로 보인다. Fig. 5.8은 응집와구조가 존재하게 되는 점의 근처($x/D=5.9$, $y/D=1.4$, $z/D=-0.1$, Fig. 5.7 (b)의 붉은색 점 부분)에 4D PTV로 측정된 데이터(U, V, W)의 시간이력을 나타내고 있다. U성분과 W성분은 0근처에서 진동하는 특성을 가지고 있음은 벽면근처이라는 점으로부터 타당한 결과이며, V의 피크성분이 주기적으로 나타나고 있는데 이들의 시간간격은 12.5msec ~ 20msec 사이였다. 이 시간간격은 벽면근처에 발생한 와환(vortex ring)이 이 점을 통과하는 주기에 해당된다고 볼 수 있다.

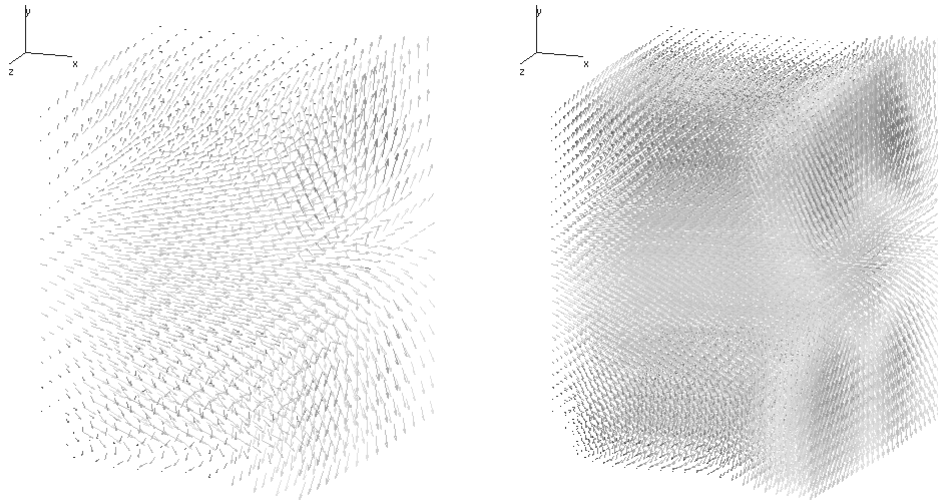


(a) Instantaneous image of camera1 (b) Instantaneous image of camera2

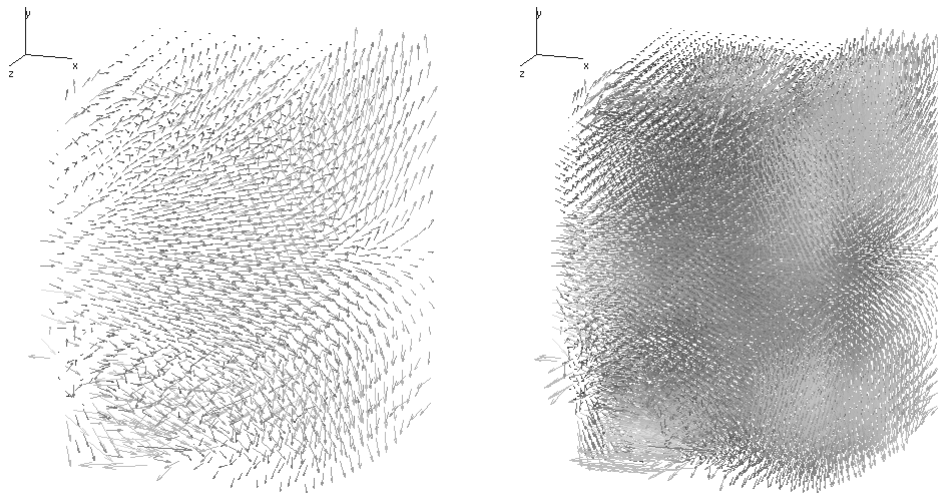


(c) 2 Instantaneous image of camera 3

Fig. 5.2 Impinged jet flow image of each camera.



(a) Mean Velocity distribution.



(b) Instantaneous Velocity distribution.

Fig. 5.3 Instantaneous spatial vectors.

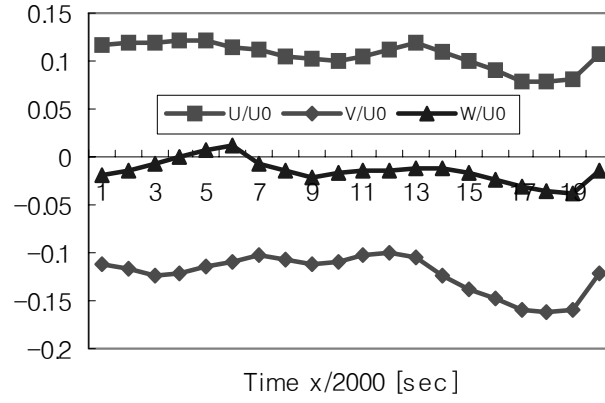


Fig. 5.4 Temporal history of 3D-velocity vectors.
($x/D=5.6$, $y/D=-2.0$, $z/D=0.0$).

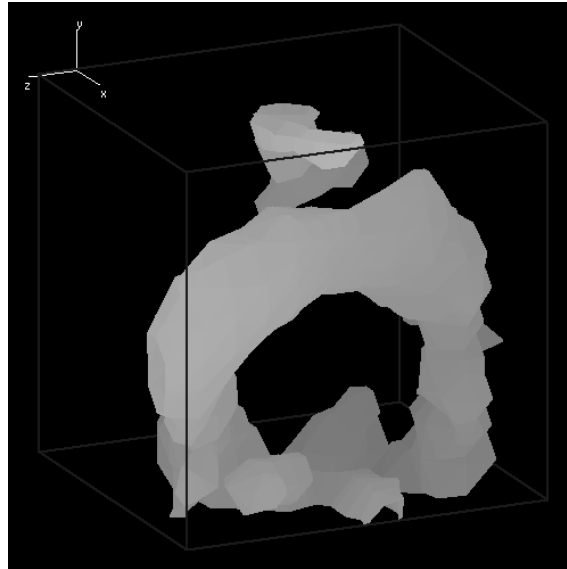
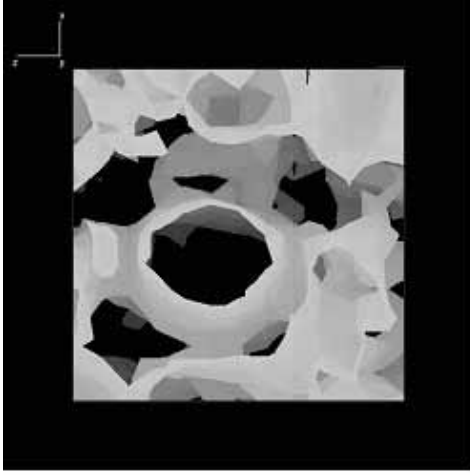
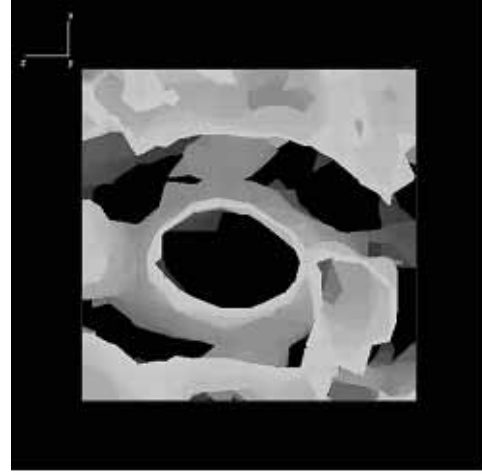


Fig. 5.5 Instantaneous spatial distribution of eigenvalue at 5% vs the whole λ_2 ranges ($t=t_0$)

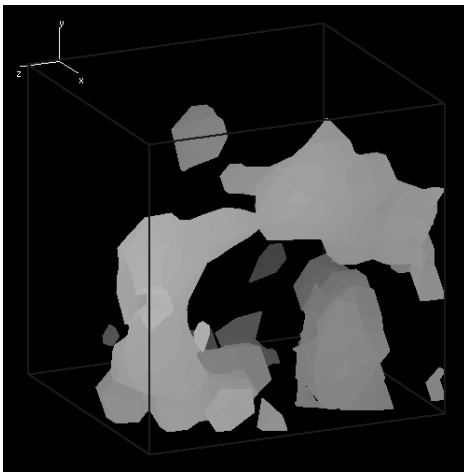


($t = t_0$)

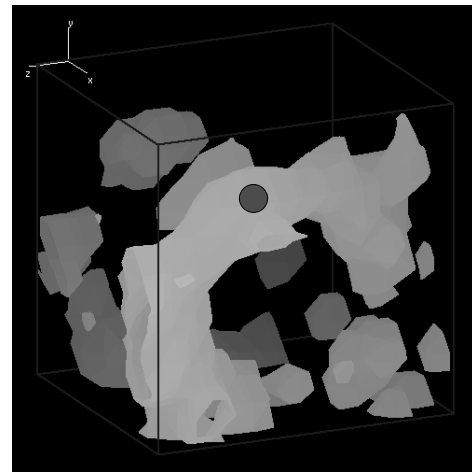


($t = t_0 + 5 \text{ msec}$)

Fig. 5.6 Time history of vorticity distribution.



(a) at $t = t_0 + 10 \text{ msec}$



(b) $t = t_0 + 20 \text{ msec}$

Fig. 5.7 Instantaneous spatial distribution of eigenvalue at 5% vs the whole λ_2 ranges.

Fig. 5.8은 시간 변화에 따른 측정 결과를 연속적인 250프레임의 영상에 대한 측정결과를 $x/D=5.9$, $y/D=1.4$, $z/D=-0.1$ 의 지점에서 시간변화에 따른 추이를 그래프로 나타낸 것이다. 이때 시간간격은 0.5 msec ($=1/2000$ frames/sec) 이다. Fig. 5.3.8은 1250/2000 ~ 1500/2000sec 범위에서 $x/D=5.8$, $y/D=2.4$, $z/D=0$ 지점의 시간변화에 따른 속도성분을 나타낸 것이다. 이 데이터의 샘플링시간 간격은 20/2000sec 이며, 그래프 상에 A, B 와 C는 그 지점에서의 와환(vortex ring)의 형상을 변화를 살펴보고자 표시하였다.

Fig. 5.10는 Fig. 5.9의 A, B와 C에 해당하는 순시시간 1321/2000sec, 1341/2000sec and 1361/2000sec 에서의 와환의 단면을 나타낸 것이다. 특정 시간 간격을 갖는 2개의 와구조가 보이고 있으며, 이 구조는 특정시간간격을 갖으면서 수평 또는 수직방향으로 꺾어짜는 듯한 형상으로 와환이 회전됨이 확인되었다. 이는 와환 주변에 작은 스케일의 와들 간의 상호작용(interactions)에 의한 것으로 사료된다.

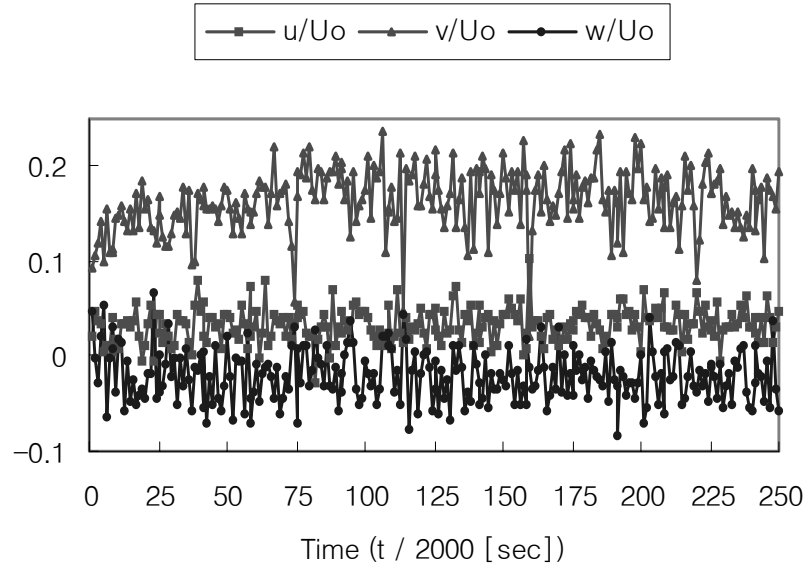


Fig. 5.8 Temporal evolution of velocity component.
(at $x/D=5.9$, $y/D= 1.4$, $z/D= -0.1$, step= 0.5 msec)

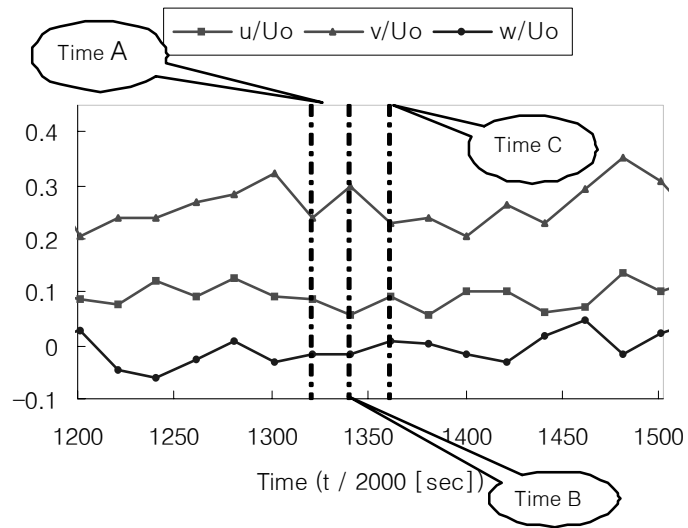
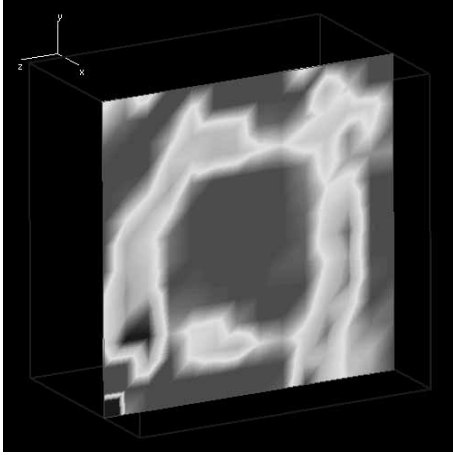
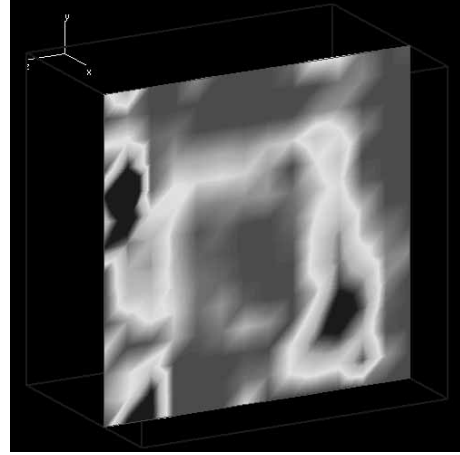


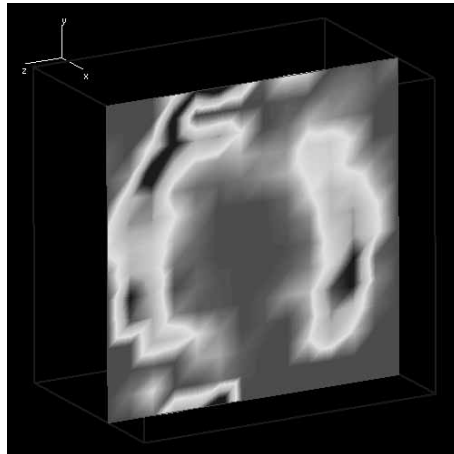
Fig. 5.9 Temporal evolution of velocity components.
(at $x/D= 5.8$, $y/D= 2.4$, $z/D= 0$, step= 10 msec)



(a) at Time A = 1321/2000 sec.



(b) at Time B = 1341/2000 sec.



(c) at Time C = 1361/2000 sec.

Fig. 5.10 Temporal changes of the vortex ring structures sampled at the times figured on Fig. 5.9.

5. 4 결론

4차원 입자영상유속계 (4D PTV, 일명 다이나믹 3D PTV)시스템을 구축하였으며 이를 이용한 충돌분류 측정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

4D PTV의 시스템으로부터 얻어진 속도벡터텐서에 대하여고유치해석법(λ_2)을 적용함으로써 충돌분류의 시간연속적 공간변화를 정량적으로 평가할 수 있었다. 노즐로부터 나온 응집구조는 충돌판을 향하여 일정간격으로 대류되어 가다가 충돌판에 부딪치는 상태에 따라서 부딪친 후 와환으로 발전하거나 부딪치기 전의 응집구조의 형태로 발전하기도 함을 확인할 수 있었으며 충돌판에서 가장 가까운 와환은 기존의 측정방법(2차원 PIV, 스테레오 PIV등)으로부터 충돌판 근처 0.9D의 위치에 존재하였으며 그 크기도 가장 컸다. 얻어진 데이터로부터 유동장의 구조를 파악하기 위해서는 이들 방법으로부터 얻어진 데이터를 위상평균 등을 통한 데이터의 가공 과정이 필요하나, 4D PTV는 유동장을 직접 Probing하므로 특징적 와유동구조의 시간적 변화와 추이를 정량적으로 평가가 가능함이 확인되었다.

4D PTV시스템으로 얻어진 방대한 데이터는 직접수치계산(DNS)에 필적하는 것으로, 추후 이를 이용하여 유동의 현상학적 규명에 발판을 마련하고자 한다.

제 6 장 3차원 유체-구조 연동운동 동시 측정 시스템의 구축

6.1 연구배경

충돌분류는 열전달뿐만 아니라 물질전달(mass transfer)에 좋은 유동특성을 지닌 관계로 종이표면의 코팅 및 금속의 표면도금에 이용되고 있다⁽⁶³⁾. Phares 등⁽⁶⁴⁾은 폭발물 검출이나 금지약품 검출을 위해 사용되는 화학약품의 샘플을 채취하거나 청결하기 위한 목적으로 물체표면상의 미립자를 추출하는데 충돌분류를 이용하였다. 최근에는 수직이착륙기에 충돌분류를 이용하는 연구에도 주목을 받고 있다. 충돌분류와 관련된 대부분의 연구는 충돌판이 딱딱한 평판이라는 조건으로 수행되고 있는데 어떤 조건에서는 평판이라는 조건이 무시될 수 없는 경우가 발생한다.

Ellen 등⁽⁶³⁾은 탄성체판에 충돌분류를 이용하여 금속을 코팅시키는 공정에서 코팅의 균일성이 압력뿐만 아니라 전단응력분포와 관계됨을 밝혔다. 그러나 탄성체판의 진동은 충돌분류와 판과의 유체-구조 연동운동은 코팅의 질을 결정짓는 요인이 되고 있다.

분류의 경우는 레이놀즈수가 300이상이 되면 난류로 뛴은 잘 알려진 사실인데 산업분야에 적용되는 대다수의 분류가 난류라는 사실에 대하여 Cziesla 등⁽⁶⁵⁾은 잘 정리하고 있다.

난류분류 자체에 대해서는 아직도 이론적으로나 수치계산으로도 완전하게 모사하기가 쉽지 않은 대상인데, 컴퓨터의 성능이 아무리 좋아진다 하더

라도 탄성체판에 충돌되는 분류에서의 유체-구조 연성문제를 모사해석하는 일은 쉽지 않는 상황에서 난류충돌분류와 탄성체판 사이에서의 유체-구조 연동운동을 실험적으로 해석하는 일은 공학적으로 매우 의의가 크다고 하겠다.

본 연구에서는 탄성체판에 충돌되는 분류의 경우에 탄성체판과 분류와의 유체-구조 상호 연동운동해석에 관한 실험적 데이터베이스를 구축하고자 하는 것을 연구의 목적으로 삼고자 한다.

6.2 실험방법

Fig. 6.1과 Fig. 6.2는 실험장치의 개요 및 전경을 나타낸다. 4대의 CMOS형 카메라가 사용되었는데 2대의 카메라(500Hz, 1k x 1k)는 탄성체판의 운동을 나머지 2대(30Hz, 1k x 1k)는 탄성체판에 분사된 분류의 유동장을 관찰할 수 있도록 설치하였다. 내경 15mm의 노즐이 탄성체판으로부터 60mm의 위치에 설치되어 있다($x/D=4.0$). 3차원 측정을 위해서는 카메라에 대한 교정작업(camera calibration)이 필요하게 되는데 Doh 등⁽⁷⁾이 적용한 교정법을 도입하였으며 각 2세트의 카메라에 대해서는 서로 다른 교정기(calibrator)를 사용하였다. 한 대는 3D PTV에 적용되는 입체형⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾을 사용하였는데 이는 두께 10mm의 알루미늄판위에 80mm x 110mm x 10mm의 공간에 기지의 3차원 위치를 가진 42개의 기준점(직경 1.0mm의 구)이 배치된 것을 말한다. 또 다른 한대는 3D PIV에 주로 사용되는 판형을 사용하였는데 5mm의 알루미늄판 위에 두께 0.5mm의 흰선으로 된 격자상의 100개의

교점들을 기준점으로 사용하였다. 이때 두 개의 교정기상의 기준점들은 각각 1/1000mm와 1/100mm의 정도를 가지는 측정기로 측정한 다음 사용하였다.

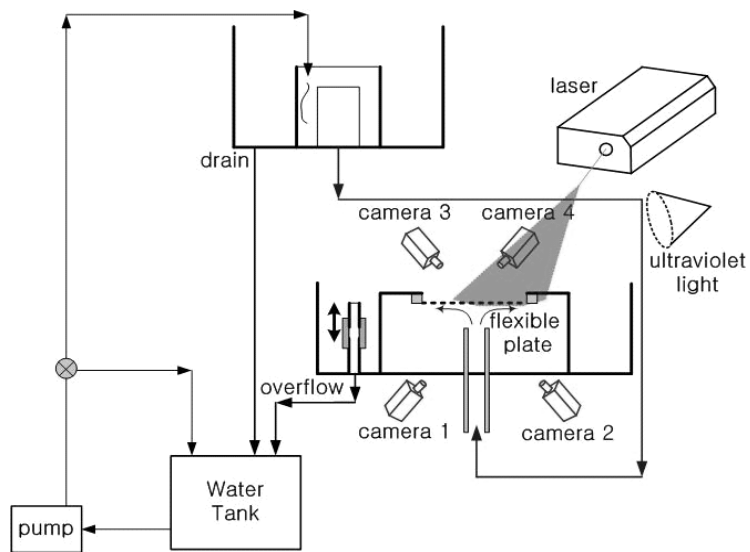


Fig. 6.1 Overall measurement system.



Fig. 6.2 Scene of experimental setup.

카메라 교정작업이 종료되면 나일론입자(직경= 150 μ m, specific gravity = 1.02)를 유동장에 투입하여 본 실험의 영상을 4대의 카메라로 취득하였다. 이들 영상은 호스트컴퓨터(2GHz)에 전송되어 표적점의 도심의 중심좌표를 구하는데 사용된다. 이들 중심좌표의 시간변화에 따른 3차원 이동량을 계산함으로써 구조물의 운동과 유체유동장을 해석할 수 있게 된다.

내경 15mm의 관으로부터 레이놀즈수 20,000으로 돌발분류가 두께 0.5mm의 실리콘 탄성박판으로 분출되었을 때 발생하는 유체-탄성구조체 간의 상호연동운동을 전술의 3D-PTV 및 비접촉식6자유도운동 측정시스템으로 측정하였다. 돌발분류는 분류의 입구에 설치된 밸브의 개폐에 의하여 생성되며 탄성판의 표면상부에 착색된 형광물질의 표적점에 대한 가시화를 위하여 자외선 조명을 사용하였다.

Fig. 6.3의 (a)와 (b)는 탄성판의 운동과 탄성판에 충돌된 분류의 유동장을 동시에 3차원 측정하기 위한 Fig. 6.1의 4대 카메라에 대한 교정작업 과정의 사진을 나타낸다. (a)는 유동장의 3차원 측정을 위한 카메라 1과 2의 교정과정의 사진을 (b)는 탄성판의 운동을 3차원 측정하기 위한 교정과정의 사진을 나타낸다. 유동장의 3차원 측정을 위해서는 이미 기술한 바와 같이 입체형 교정기를 이용하였다. Fig. 6.4의 (a)와 (b)는 각각 카메라 1, 2 및 카메라 3, 4를 교정하기 위한 교정기에 대한 카메라 영상을 나타낸다.

한편, 탄성판의 3차원적 거동을 측정하기 위하여 직경 380mm인 탄성판의 상부에 Fig. 6.5와 같이 배치되어 있는 표적점의 3차원적 시간변화를 Fig. 6.1의 카메라 3과 4로 영상화하였으며 돌발분류 유동의 거동을 측정하

기 위해서는 Fig. 6.1의 카메라 1과 2로 영상화하였다. 카메라 영상에 나타난 표적점 영상의 사진좌표와 유동장 미소입자들의 영상의 사진좌표 및 각 카메라들의 파라미터를 이용하여 기술한 바와 같은 3차원 측정의 원리로 탄성판 표적점의 3차원 위치이동 및 미소입자들의 3차원 속도벡터 계산을 수행하였다. 탄성판의 운동을 측정하기 위해서는 Fig. 6.6에 나타나 있는 바와 같이 십자형(+)의 17개의 표적점의 운동정보를 이용하였다.



(a) for camera 1 & 2 (volume type was used)

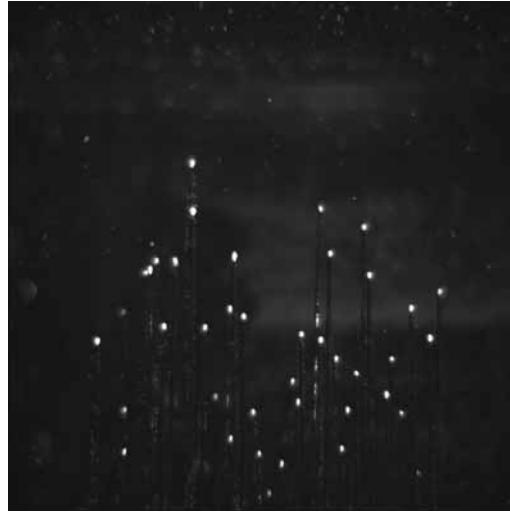


(b) for camera 3 & 4 (plate type was used)

Fig. 6.3 Scene of camera calibrations.

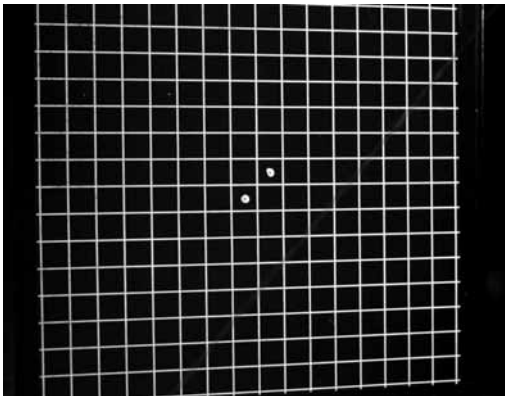


viewed by camera 1

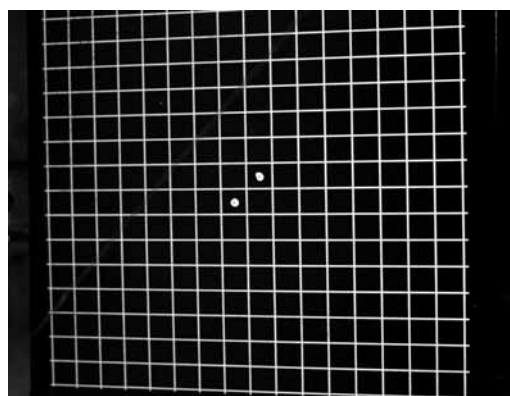


viewed by camera 2

(a) Images of calibrator for camera 1 & 2



viewed by camera 3



viewed by camera 4

(b) Images of calibrator for camera 3 & 4

Fig. 6.4 Images of the two calibrators used for the four cameras.

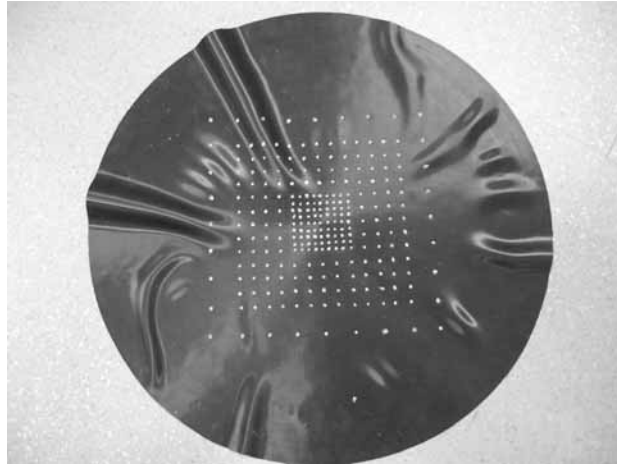


Fig. 6.5 Image of tracking targets on the surface of the flexible plate.

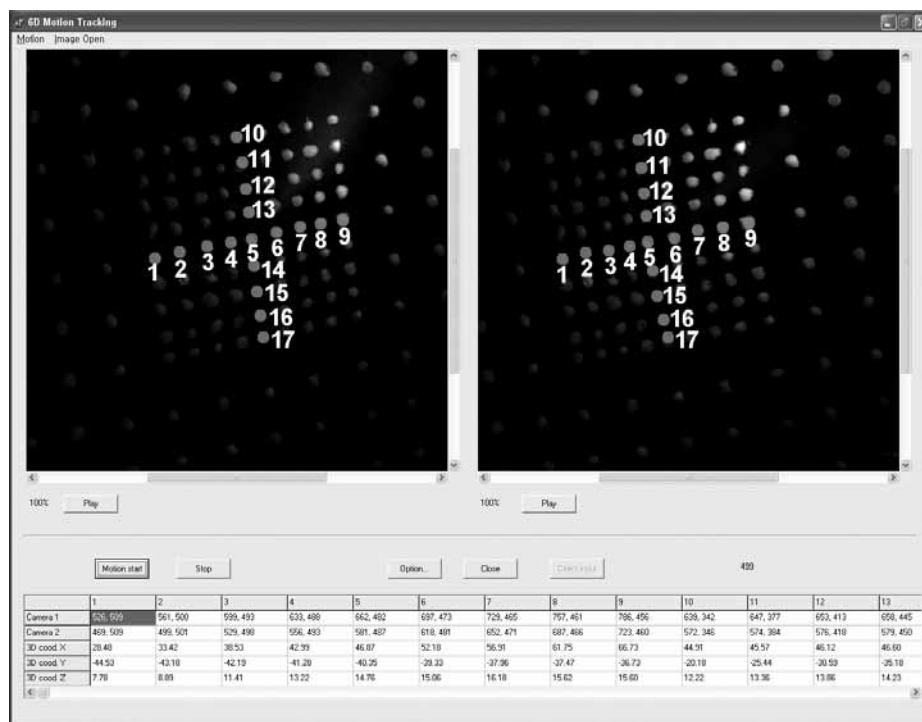


Fig. 6.6 Used target images for motion tracking.

6.3 실험결과

본 논문에서는 Fig. 6.1의 실험장치의 하부에 설치된 원형노즐의 밸브를 1회 단속(斷續)하였을 때, 반복하여 연속으로 단속하였을 때, 1회 개방 후 지속적으로 개방상태로 두었을 때의 분류유동장과 탄성체 충돌판의 운동장을 동시에 측정하였다. Fig. 6.7 (a), (b)는 탄성판의 운동과 돌발분류 유동장의 운동을 담은 한 순간에서의 카메라 4대의 영상을 나타낸다. 전술의 ‘양방향 운동 추적알고리즘’과 ‘측정영역 다분할 3D PTV (4D PTV)알고리즘’을 1회 단속하였을 때의 영상에 적용한 결과를 Fig. 6.8와 Fig. 6.9에 나타낸다. Fig. 6.8는 시간변화에 따른 Fig. 6.6의 탄성판상의 점 4, 5, 6, 13, 14번 표적점들의 x, y, z 방향에 각각 변이량(mm)을 나타내고 Fig. 6.9은 3시각(측정 개시로부터 157 frame, 175 frame, 185 frame째의 시각)에서 측정된 유동에 대한 3차원 속도장을 나타낸다. 속도장 측정에서는 약 2500개 전후의 순간속도벡터가 구해졌다. Fig. 6.9에서 보는 바와 같이 모든 표적점들의 변이가 거의 일치함을 알 수 있는데 이는 탄성판이 중심점을 기준으로 점대칭 운동을 하고 있음을 의미하는데 이는 합당한 결과로 볼 수 있다. 185 frame째에 충돌판이 최대의 운동을 한 정점이 되었으며 300 frame째 이후로부터는 돌발분류로부터 분출된 유동에너지가 여전히 남아 있는 관계로 탄성판이 상하로 약하게 진동하고 있음을 알 수 있다. 한편, 유동장을 살펴보면 157 frame째(밸브개방은 150 frame째에 실시)에 유동장은 수평방향의 와구조를 지니고 있다가 탄성판 운동이 최대가 되는 점 즉, 정점에서는 유동은 수직방향의 와구조를 지니고 있음을 알 수 있다.

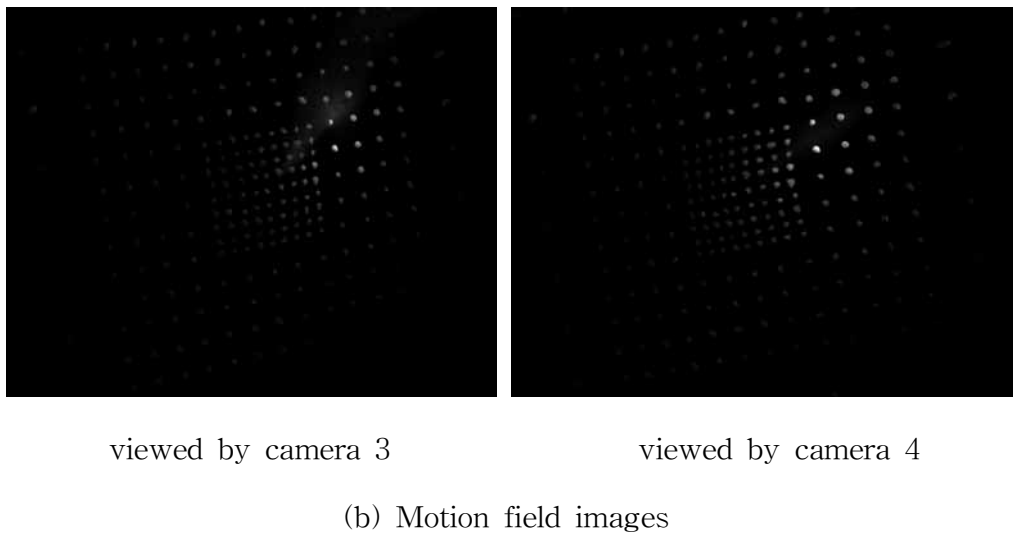
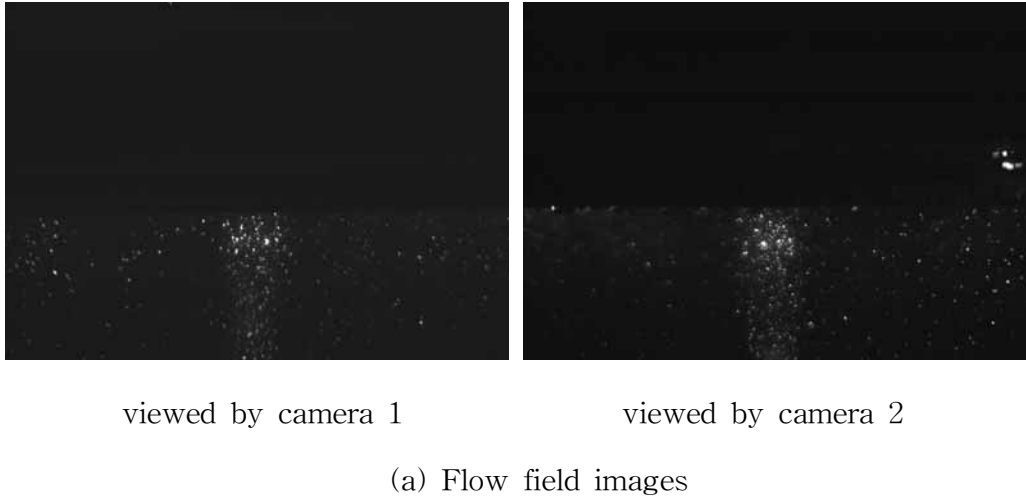


Fig. 6.7 Raw images at the same instance.

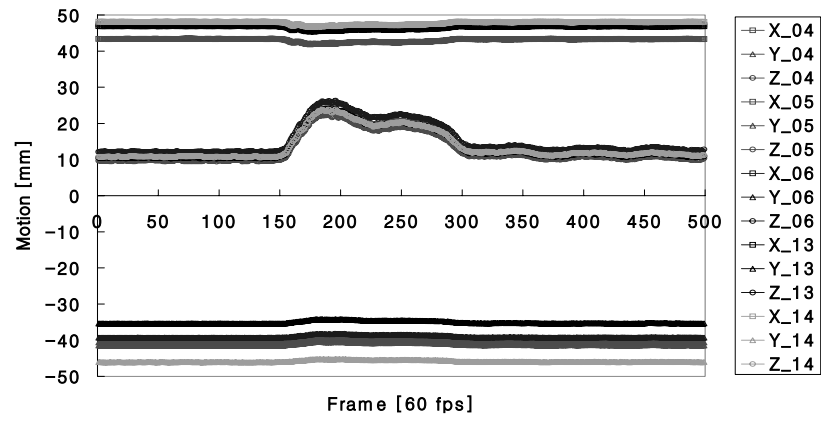


Fig. 6.8 Measured motion field with time changes.(single open case)

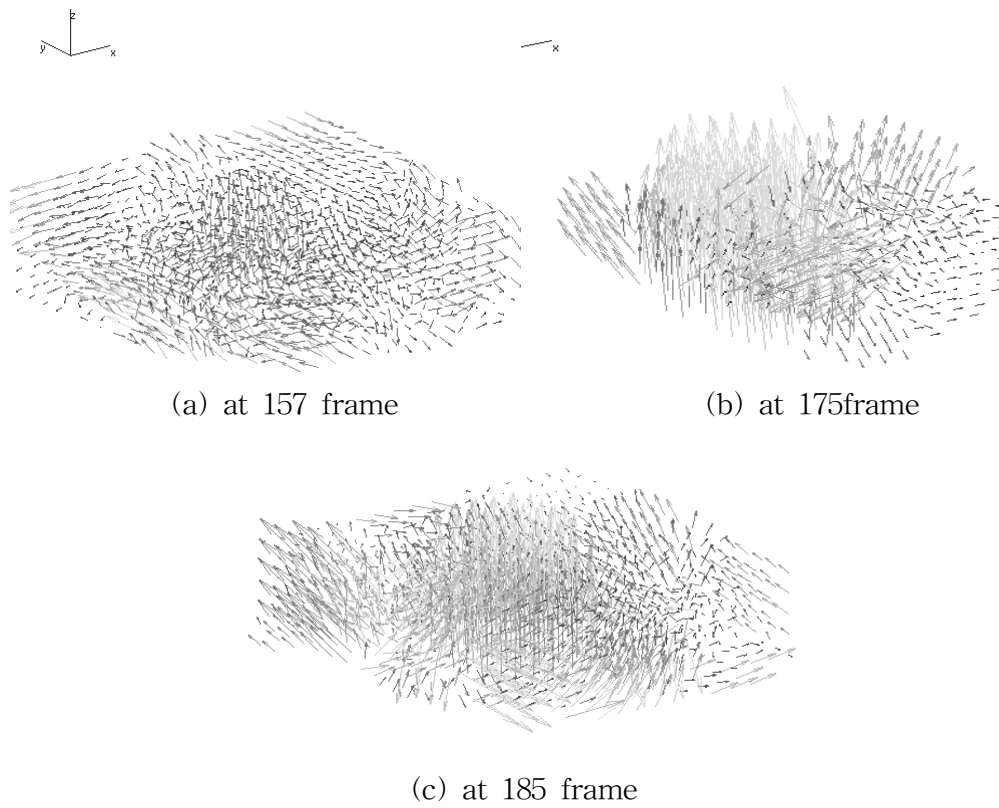


Fig. 6.9 Measured flow field of the impinged jet.

Fig. 6.10는 분류노즐 입구밸브를 반복하여 연속으로 단속하였을 때의 시간변화에 따른 탄성판상 표적점들의 변이량을 나타내고 Fig. 6.11는 이 때의 밸브 개방초기에 해당되는 110 frame째, 탄성체판이 최대 정점에 있게 되는 146 frame째, 그리고 다음번 밸브 개방직전인 168 frame째에서의 3차원 속도장을 나타낸다. 탄성체판의 운동은 146, 268, 366, 485 frame째에서 최대 이동량을 나타내었는데 최대 정점간의 frame 간격이 약 120 frame전후인데 이는 2초에 해당되는 것으로 밸브의 단속간격에 해당된다. 본 결과에서도 알 수 있듯이 탄성판의 운동은 점대칭 운동을 하고 있음이 나타났는데 이는 합당한 결과이며 밸브를 비정상(unsteady)으로 작동하여도 분출된 분류는 탄성판의 운동에 축대칭으로 작용하고 있음을 추론할 수 있다.

Fig. 6.12은 분류노즐 입구밸브를 1회 개방 후 지속적으로 개방상태로 두었을 때의 시간변화에 따른 탄성판상 표적점들의 변이량을 나타내고 Fig. 6.13은 이 때의 탄성체판이 최대 정점에 있게 되는 148 frame째에서의 3차원 속도장을 나타낸다.

1회 단속의 경우보다 반복단속의 경우가 탄성체 판으로 향하는 유동이 강하게 작용하고 있음을 알 수 있으며 1회 단속후 밸브를 지속적으로 개방하는 경우에는 탄성체 판으로 향하는 유동이 강하면서 균일한 유동상태를 보임을 알 수 있다.

전술의 3가지 경우 모두 유동장의 3차원 속도장으로부터 확인된 사항으로서 탄성판 중앙점에 해당되는 분류의 정체점에서의 와는 벽면 상부를 따라 외곽으로 빠져나갔는데 이는 벽면이 딱딱할 경우의 외곽으로 빠져나가기 전에 대규모와환(vortex ring)으로 발달되는 양상과 다른 양상이었다.

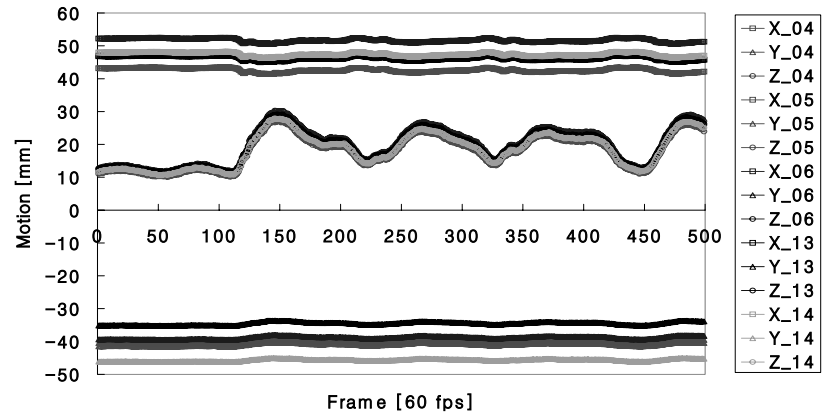


Fig. 6.10 Measured motion field with time changes.(multiple open case)

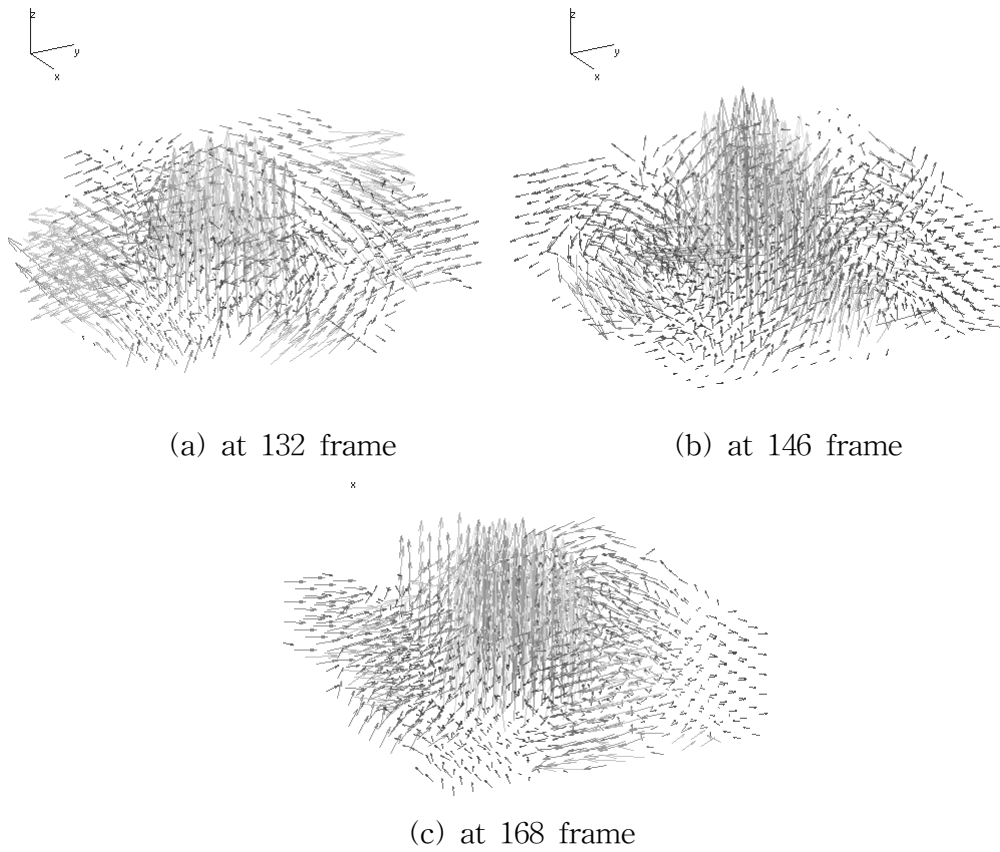


Fig. 6.11 Measured flow field of the impinged jet.

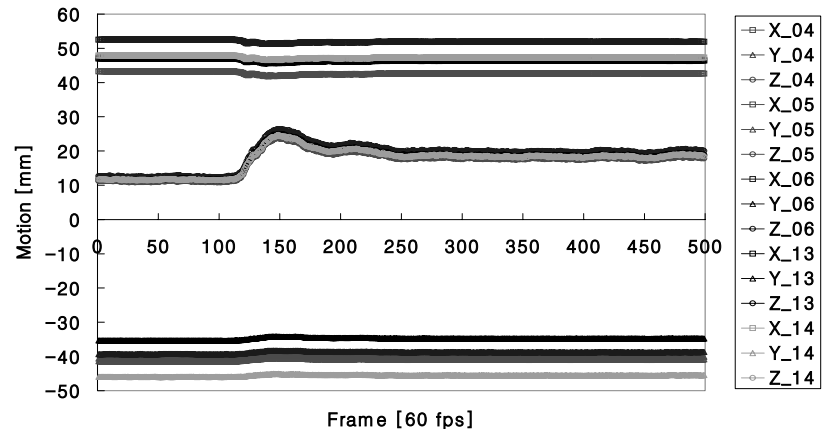


Fig. 6.12 Measured motion field with time changes.(single opened case)

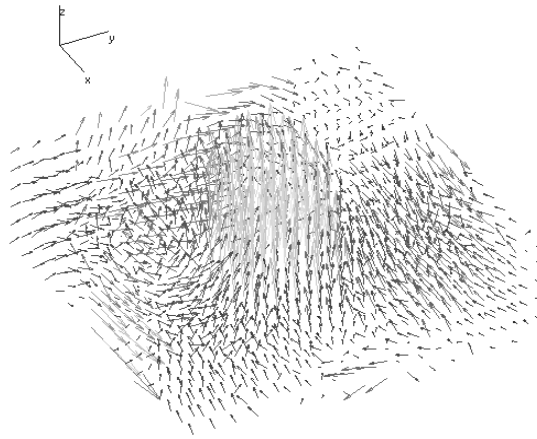
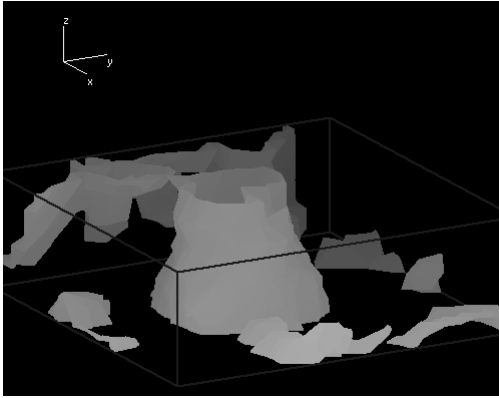
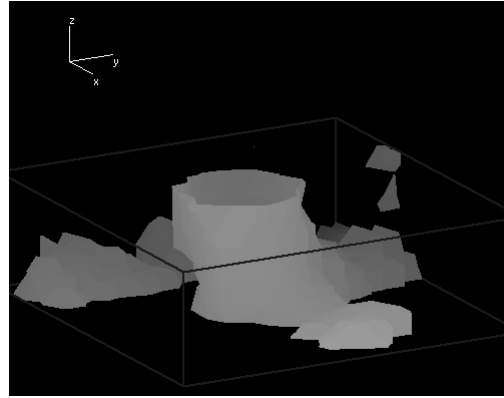


Fig. 6.13 Measured flow field of the impinged jet.(at 148 frame)

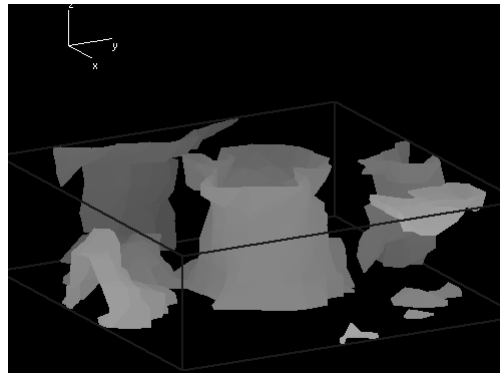
Fig. 6.14은 위의 세 가지 경우에서 탄성판의 이동량이 최대 정점에 달했을 순간에서의 유동장의 난류운동에너지 분포를 나타내고 있다. 1회 단속의 경우에 해당하는 (a)에서는 난류강도의 분포가 원추형이 되어 있음을 알 수 있는데 상부에 난류운동에너지분포가 다른 경우보다 밀집되는 경향을 보인다. 이는 난류운동에너지가 탄성체판의 존재로 인하여 흡수됨을 의미한다. 한편, (b)의 경우를 보면 상하 수직인 분포를 보이고 있음을 알 수 있는데 이는 분류가 지속적으로 단속됨으로 인한 탄성체판으로의 난류운동에너지 흡수가 줄어들음을 의미한다. 또한, (c)의 경우를 보면 상부와 하부에 장고형의 분포를 보이고 있음을 알 수 있는데 이는 탄성체 판으로의 난류운동에너지 흡수는 줄어들되 탄성체 판으로부터 임의의 거리에 난류운동에너지 흡수 구역이 존재함을 의미한다.



(a) single open case



(b) multiple open case



(c) single opened case

Fig. 6.14 Distribution of turbulent kinetic energy at the top positions.

6.4 결론

4대의 카메라의 영상을 이용하여 탄성구조물의 운동과 구조물 주위의 유체유동장을 동시에 측정할 수 있는 시스템을 구현함으로써 유체-구조 연동 문제(FSI)를 정량적으로 측정할 수 있는 계측기법을 개발하였으며 이를 탄성판 돌발충돌 분류 유동장에 적용하였으며 이로부터 다음과 같은 결론을

얻었다.

구축된 측정시스템으로 카메라교정기의 기준점을 측정한 결과와 원래의 기준점과의 비교를 통하여 측정시스템에 대한 오차해석을 수행하였다. 그 결과, x방향의 평균오차 및 표준편차는 0.20mm 및 0.30mm, y방향의 평균오차 및 표준편차는 0.19mm 및 0.25mm, z방향의 평균오차 및 표준편차는 0.30mm 및 0.55mm 이었다. 이는 측정영역의 한 변의 길이가 약 100mm정도 인 것을 고려해 봤을 때, 길이대비 1%정도의 오차임을 알 수가 있다.

탄성체 충돌분류의 노즐입구 밸브를 1회 단속하였을 경우, 여러번 단속하였을 경우, 1회 단속 후 개방상태유지의 경우에 대한 실험으로부터 유동장으로부터의 난류운동에너지는 탄성체판으로의 에너지 전달에 뚜렷한 차이를 보임이 확인되었는데, 특히 1회 단속 후 개방상태유지의 경우에는 난류운동에너지가 흡입되는 영역이 충돌판으로부터 $x/D=0.5$ 정도 떨어진 점에 존재함이 확인되었다. 한편, 유동장에 대한 측정결과로서 3차원 속도장은 탄성판의 운동과 함께 물리적으로 타당한 결과를 보였다. 즉, 분류가 분사되었을 때의 질량유량의 증가에 따라 표면 중앙상부에의 유량이 분사초기에는 빠져나감이 확인되었다.

탄성판 정체점에서의 와는 벽면 상부를 따라 외곽으로 빠져나갔는데 이는 탄성벽이 아닌 딱딱한 벽면의 경우에서 외곽으로 빠져나가기 전에 대규모와환(vortex ring)으로 발달되는 양상과 다른 양상이었다.

제 7 장 건축물 공조시스템 실내기류 측정

7.1 연구배경

실내기류에 대한 예측기술은 실내에 거주하는 사람의 쾌적 환경조성, 반도체공정에 필요한 클린룸내부의 기류설계, 냉난방시스템에서의 에너지절약형 공조 설계에 매우 중요한 역할을 한다.

실내기류 예측을 위한 기술에는 수치모사(numerical simulation)법과 실험측정법이 있다. 실내기류예측을 위한 수치모사법은 일반적으로 대규모 계산을 수행하여야 하는 관계로 계산비용이 많이 들게 되는 점, 계산을 통하여 얻어낸 결과도 실내의 형상이 복잡하거나 실내 공간이 대규모일 경우에는 결과물의 공간해상도가 그다지 높지 않다는 점 등의 문제점이 있어 왔는데 이를 극복하기 위한 다양한 계산모델이 개발되어 왔다⁽⁶⁶⁾⁽⁶⁷⁾. 그럼에도 불구하고 계산대상 규모의 대형화 및 실내기능의 첨단화 등에 따라 기류에 대한 보다 정확한 계산을 추구하고자 하는 요구가 날로 증가추세에 있는 관계로 수치계산결과에 대한 실험측정을 통한 정확성 검정과정은 필요사항으로 여겨지고 있다.

문과 손⁽⁶⁸⁾은 실내기류에 대한 축소모형 실험에서의 축소스케일 결정법에 관한 내용을 보고하였는데, 정성적인 스모크 가시화기법과 다점열선유속계에 의거한 실험적 검증법을 다루고 있다. 그러나 다점열선유속계에 의한 측정을 위해서는 매 측정마다 실험조건의 재현성을 유지하여야 하는 관계로

축소모델의 정성적 가시화에 의한 유동패턴과 속도측정결과에 의한 결과로부터 상사성 확인작업에는 상당한 시간이 소요되는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점이 있어왔던 관계로 실내기류 혹은 대규모 기류에 대한 모델실험에 관한 연구보고가 거의 전무의 실정이다. 일례로 주(朱) 등⁽⁶⁹⁾은 실내에 있는 인간의 호흡에 의한 기류의 특성을 조사한 바가 있는데, 원래 이들 연구의 최종목표는 실내에 있는 인간을 포함한 각종 열원, 기류의 흡·토출구 등을 총망라한 상황에서 실내기류전체에 대하여 PIV⁽¹⁾에 의한 속도장을 얻어 내는 것이었으나 실내 전체를 축소모델화 한 상사모델실험이 어려웠던 관계로 실제 크기모델에서의 인간의 호흡기 근처에서만 PIV에 의한 속도장 결과를 수치계산의 경계조건으로 활용한 다음 실내전체에 대한 기류해석은 수치계산에 의존하였다.

본 연구에서는 파노라마-PIV기술 개발을 통하여 열선유속계의 반복실험에 따른 실험재현성 문제를 극복함과 동시에 축소모델 내부에 대한 국소적 측정이 아닌 모델전체에 대한 실험적 기류해석이 가능한 PIV해석법의 완성을 연구의 목적으로 삼고자 한다.

7.2 실험방법

일반적으로 실내기류에 대한 상사실험을 하기 위해서는 가능하면 축소스케일비가 작은 것이 좋은 것으로 알려져 있는데⁽⁶⁸⁾ 그렇게 되면 모델이 커지게 된다. 본 연구에서는 이를 고려하여 축소모델 전체에 대한 유동장 측정이 가능한 파노라마 PIV기술을 구축하였다. Fig. 7.1은 파노라마 PIV측정

실험 장치의 개요도를 나타낸다. 그림에서와 같이 두 대의 카메라영상이 축소모델전체를 관측할 수 있도록 설치를 하였다. 기류는 모델입구부에 설치된 블로워(blower)로 생성되고 가시화를 위하여 블로워 입구에 스모크(파라핀오일)발생기를 설치하였다. Fig. 7.2는 파노라마 PIV실험전경을 나타낸다.

본 실험에서는 3가지 모델시험이 수행되었으며 이들 모델에 대한 크기사항이 Table 7.1에 나타나 있다. Fig. 7.1과 같이 환기용 흡입구 및 배출구가 설치된 실제크기의 방을 9.6, 13.7, 19.2축소스케일 모델로 실험을 수행하였다. 일반적인 건축물의 흡입구와 토출구는 직경이 Table 7.1에 표시된 바와 같이 150mm 전후인데 본 연구를 위한 모델에서는 용이한 가시화실험을 위하여 상기의 실 모델축소비와 동일한 축소비로 하지 않고 그보다 큰 스케일비인 3.0, 4.3, 5.0으로 하였다. 본 연구에서는 축소모델실험에 대한 PIV측정 결과로부터 실 건축물의 실내기류특성을 예측하고자 할 때 유의해야할 사항을 정립하고자 하는 것과, 축소모델에 따른 상사성을 살펴보고자 하는 것을 주요 연구내용으로 삼고 있으므로 물리적으로 합당한 축소스케일의 크기이내에서 실험을 수행하였다.

Table 7.2는 실험조건을 나타낸다. 세 가지 모델에 대하여 기류의 흡입구를 통하여 흡입되는 속도를 변경하였을 경우(즉, 유량 혹은 레이놀즈수를 변경시켰을 때)와 레이놀즈수를 일정히 하였을 경우에 모델내부의 유동특성을 살펴보았다. 기류의 속도조절(유량조절)은 블로워에 부착된 인버터에 의하였다.

Fig. 7.2는 실내기류측정 실험의 전경을 나타낸다. 파노라마 PIV 측정장치는 레이저광원(Nd-Yag, 120mJ), 두 대의 고해상카메라(Kodak ES1.0, 1k

x 1k)와 이들을 동기시키기 위한 동기장치(LC880)으로 구성되어 있다.

가시화측정실험은 다음과 같은 절차로 진행된다. 블로워를 구동하여 정상적 실험조건에 달하면 스모크를 공급한다. 다음으로 2차원 레이저광원을 모델의 중앙단면 (흡입구 중심선상)상에 조사(照査)하고 가시화된 단면을 향하여 설치된 두 대의 카메라영상을 획득한다. 마지막으로 획득한 영상을 파노라마 영상으로 구성한 뒤 이 영상에 대하여 계조치상호상관법을 적용하여 속도장을 얻는다. 이 때, 파노라마 영상으로 구성하기 위해서는 카메라영상에 나타난 측정위치의 물리적 위치에 대한 교정을 하여야 하는데 실험을 개시하기 전에 교정작업을 완료하여야 한다.

파노라마 PIV측정이란 두 대의 독립된 카메라영상을 조합하여 얻어지게 되는 광역의 영상 두 시각분에 대하여 계조치상호상관법을 적용함으로써 넓은 영역에 걸친 속도장을 얻어낼 수 있는 것을 의미한다.

계조치상호상관법⁽²⁾은 시각차를 가진 두 영상영상 밝기를 나타내는 함수를 각각 f 와 g 로 하여 아래 식 (7.1)로 표시되는 상호상관함수를 계산한 결과가 최대치가 되는 점을 입자이동의 위치(속도벡터의 종점)로 하였다.

$$c_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \overline{f_i}) (g_i - \overline{g_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \overline{f_i})^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \overline{g_i})^2}} \quad (7.1)$$

여기서, n 은 상관영역의 크기이고 본 연구에서는 32 x 32픽셀크기로 설정하였다. 수식내의 $\overline{f_i}$ 와 $\overline{g_i}$ 는 평균값을 의미한다.

두 대의 카메라영상으로부터 하나의 파노라마 영상을 만들기 위해서는

두 영상에 나타난 임의 물체의 위치가 물리좌표계상에서 일치시켜야 한다.

이를 위하여 두 대 카메라영상에 대한 교정(calibration)작업을 필요로 한다. 이를 위하여 10mm거리간격을 가진 격자판을 교정판으로 사용하였다. Fig. 7.3은 두 대 카메라의 교정을 위하여 두 카메라를 격자판을 향하여 설치한 후 영상을 획득하였을 모습을 나타낸다. 이 때, 격자판은 실험에서의 실제측정단면상에 설치하여야 한다. Fig. 7.4는 아래의 선형변환식 (7.2)를 사용하여 두 영상간의 좌표를 물리좌표계상으로 변환하여 조합한 파노라마 영상을 나타낸다.

$$\begin{aligned}\frac{a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}}{a_{31}X + a_{32}Y + 1} &= x \\ \frac{a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}}{a_{31}X + a_{32}Y + 1} &= y\end{aligned}\tag{7.2}$$

여기서 (X,Y)는 카메라영상 좌표, (x,y)는 물리좌표이며 a_{ij} 는 상기 격자판의 교점을 기준점으로 삼아 다변수회귀계산법으로 구한 선형변환행렬을 나타낸다. Fig. 7.5는 각 카메라의 실제실험영상을, Fig. 7.6은 식 (7.2)에 의거 Fig. 7.5의 두 카메라영상을 조합한 파노라마영상을 나타낸다. 이 파노라마영상의 두 시각의 영상으로부터 전술의 계조치상호상관법으로 속도장을 구하였다.

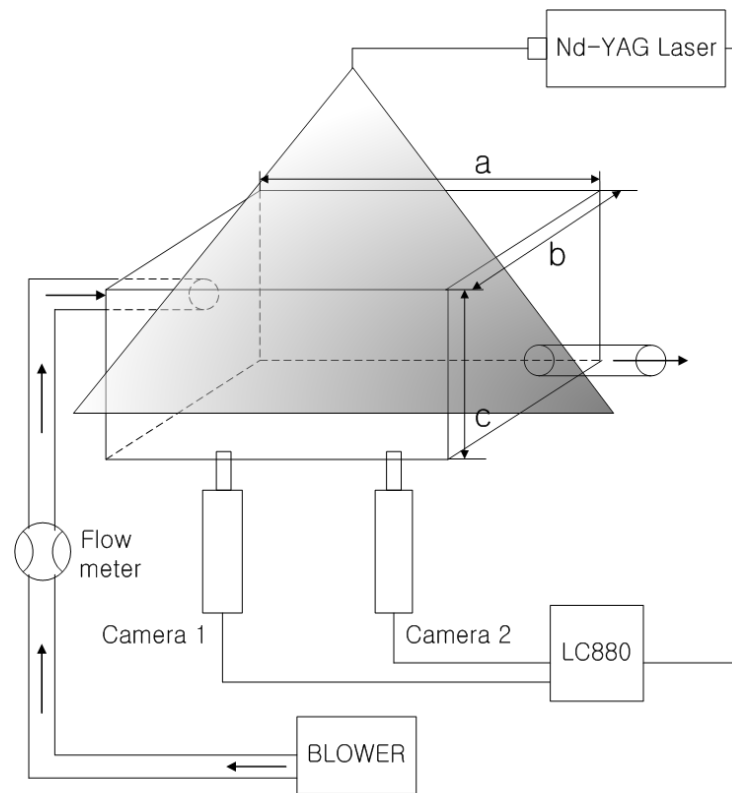


Fig. 7.1 Experimental setup.

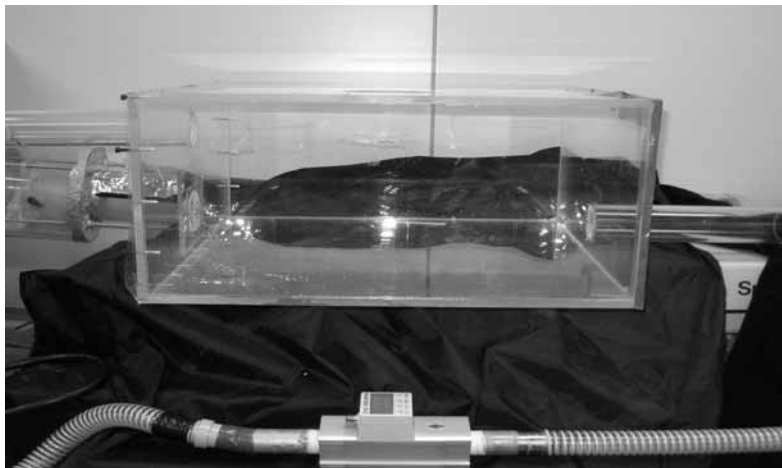


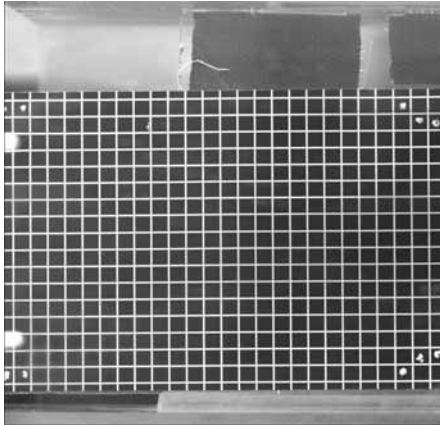
Fig. 7.2 Experimental setup views.

Table 7.1 Specification of three models.

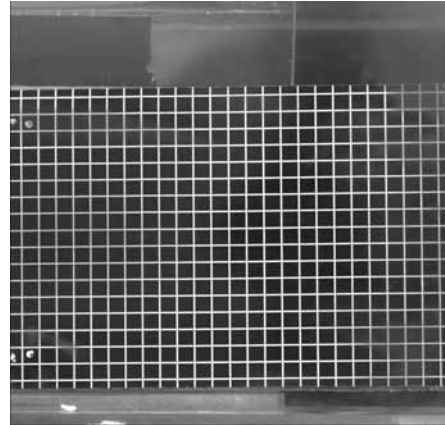
Actual Model	4,800(W) x 4,900(D) x 2470(H) with 150 inlet & outlet ventilations		
	Model A	Model B	Model C
Scale	1/9.6	1/13.7	1/19.2
Inlet & Outlet Diameter	1/3.0	1/4.3	1/5.0

Table 7.2 Experimental conditions for models.

Exp. conditions		Model A	Model B	Model C
		Flow rate, L/min	Flow rate, L/min	Flow rate, L/min
		Re number	Re number	Re number
Constant inlet velocity, m/sec	5.5	647.9	317.5	233.2⑤
		18,321	12,825	10,993
	3.5	412.3	202④	148.4
		11,659	8,161	6,995
Constant Re number		206.1	144.3	148.4
		6,995①	6,995②	6,995③
※Re number is based on the inlet diameter.				



(a) camera 1



(b) camera 2

Fig. 7.3 Calibrator images.

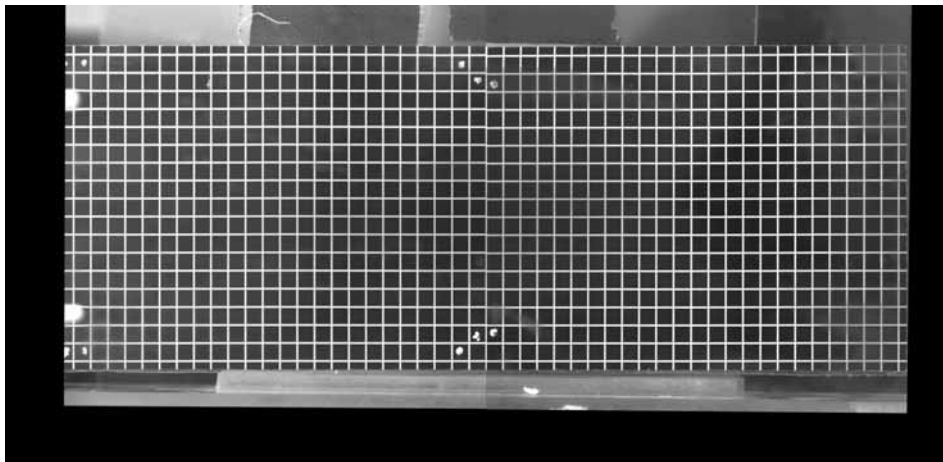
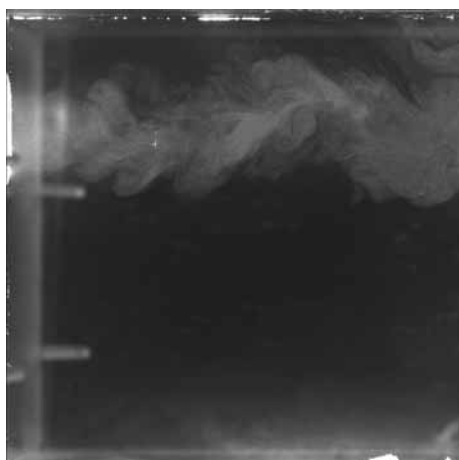
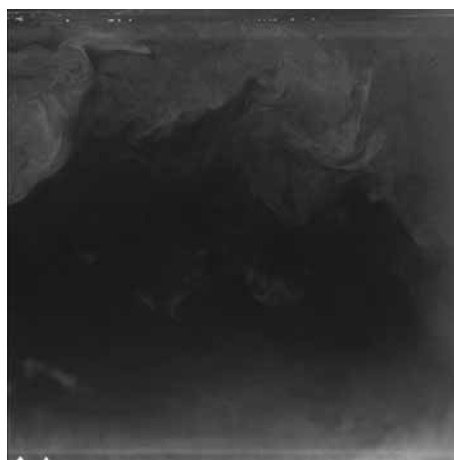


Fig. 7.4 Panoramic image of the calibrator.



(a) camera 1



(b) camera 2

Fig. 7.5 Experimental images.

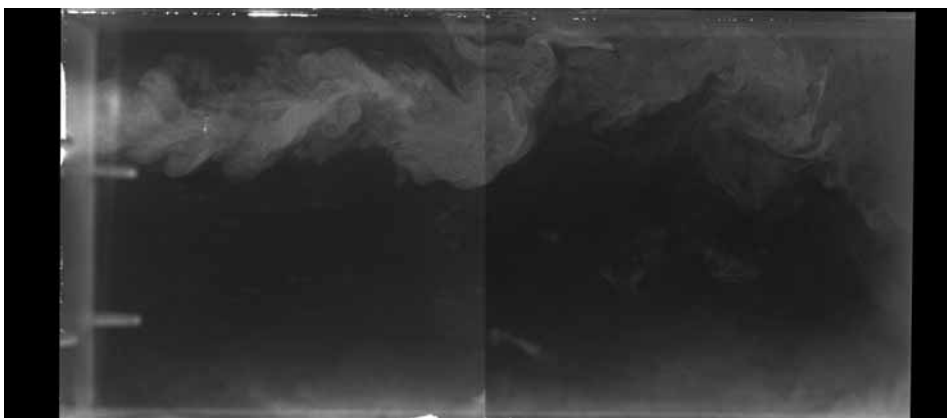
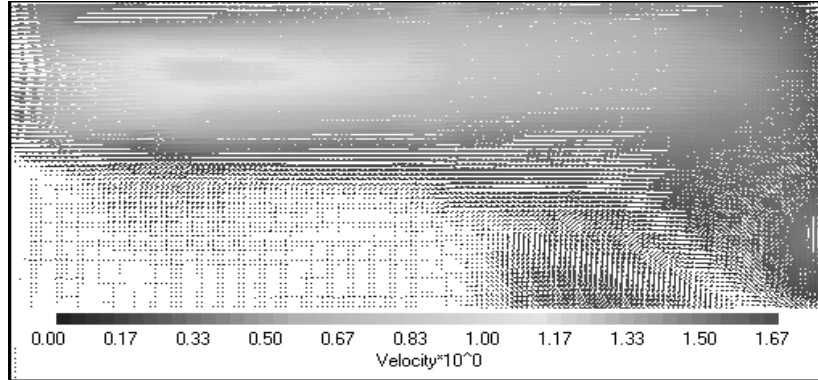


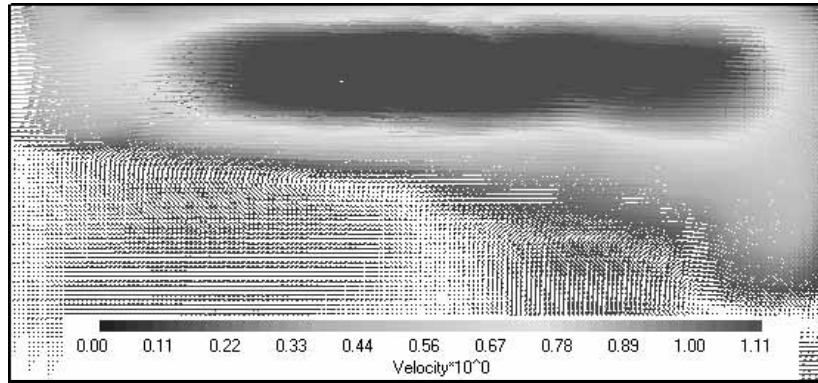
Fig. 7.6 Experimental panoramic image.

7.3 실험결과

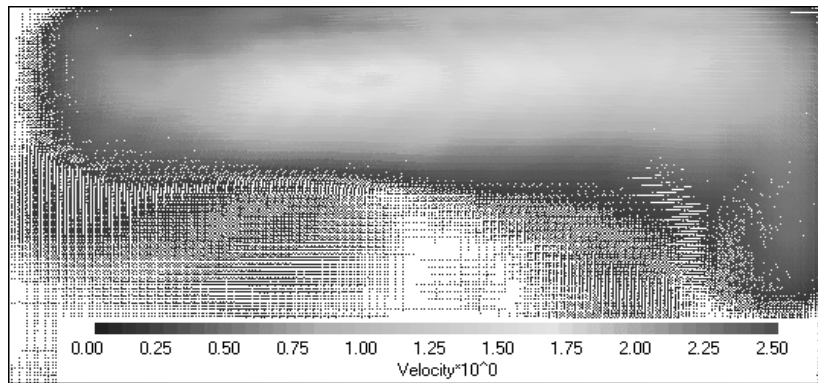
Fig. 7.7은 Fig. 7.6의 파노라마영상으로부터 구한 파노라마 PIV측정결과를 나타낸다. 그림에서 (a), (b) 및 (c)는 Table 7.1과 Table 7.2에 나타나 있듯이 세 가지 모델에 대하여 동일한 레이놀즈수일 때의 평균유속분포를 나타낸다. 그림에서 (a)와 (b)의 유동형태는 서로 다르며 (b)와 (c)의 유동형태는 서로 유사함을 알 수 있다. 이는 Fig. 7.8의 난류운동에너지 $((1/2) \cdot \sqrt{u^2 + v^2}/U_o)$ 분포로부터 더욱 명확하게 나타나는데 이들 그림으로부터 요약될 수 있는 것은 Table 7.2의 ①, ②, ③의 실험조건에서 알 수 있듯이 실내기류의 상사성은 레이놀즈수에 의하기 보다는 유량에 관계함을 알 수 있다. 즉, 유량이 유사하면 유사한 유동패턴을 보임을 알 수 있다. 이는 Table 7.2의 ④, ⑤의 실험조건(서로 다른 레이놀즈이지만 유사한 유량)일 때, 유사한 속도분포 및 난류운동에너지분포를 보이게 되는 Fig. 7.9 및 Fig. 7.10으로부터도 재차 확인될 수 있는 특성이다. 이와 같은 결과는 문과 손⁽⁶⁸⁾의 연구성과에서도 확인된 바가 있는데 그들의 보고에 의하면 실내기류의 유동의 상사성은 레이놀즈수가 1000이상이면 레이놀즈수에 의하지 않는다고 한 성과와 잘 일치하고 있음을 보여준다. 본 연구는 축소모델에 대한 유동가시화 영상으로부터 실내기류 특성을 단번에 확인할 수 있다는 점에서 기존의 성과보다 의의가 있는 것으로 사료된다.



(a) Model A(Table 7.2 case ①)

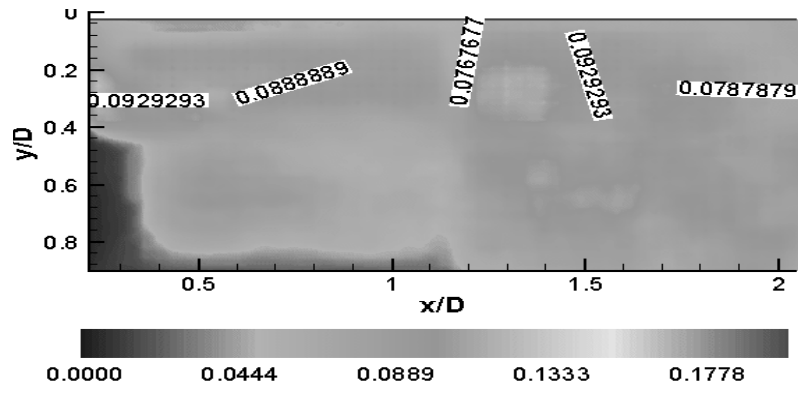


(b) Model B(Table 7.2 case ②)

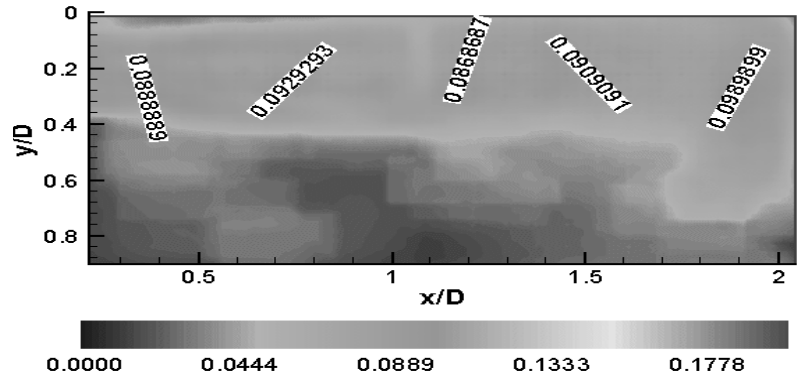


(c) Model C(Table 7.2 case ③)

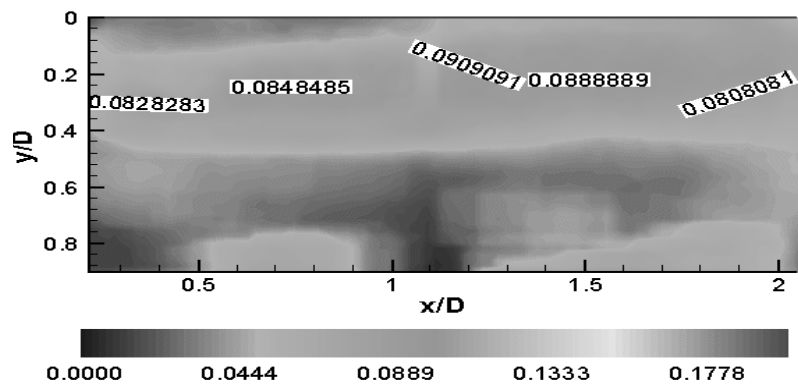
Fig. 7.7 Mean velocity vector distributions.



(a) Model A(Table 7.2 case ①)

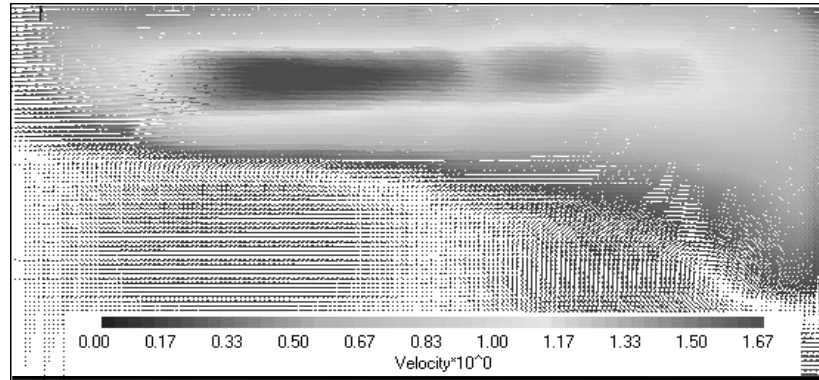


(b) Model B(Table 7.2 case ②)

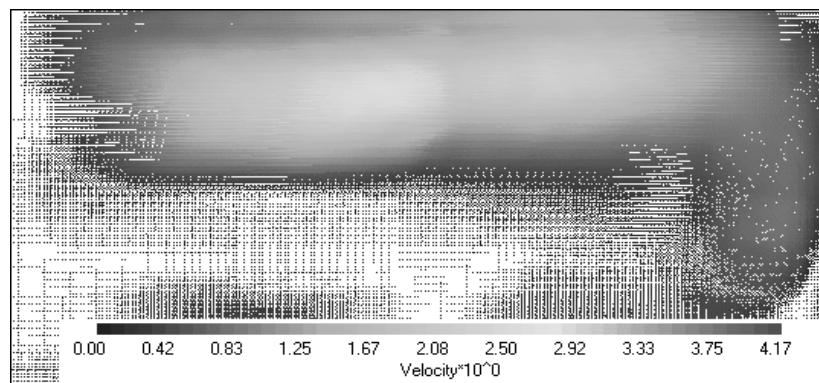


(c) Model C(Table 7.2 case ③)

Fig. 7.8 Turbulence kinetic energy distributions.

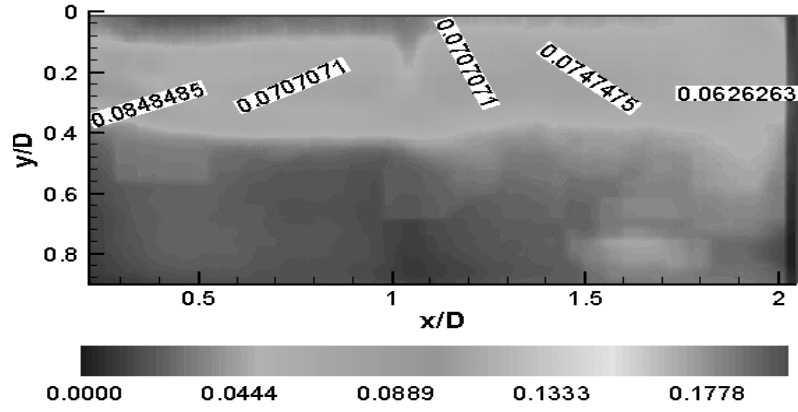


(a) Model B(Table 7.2 case ④)

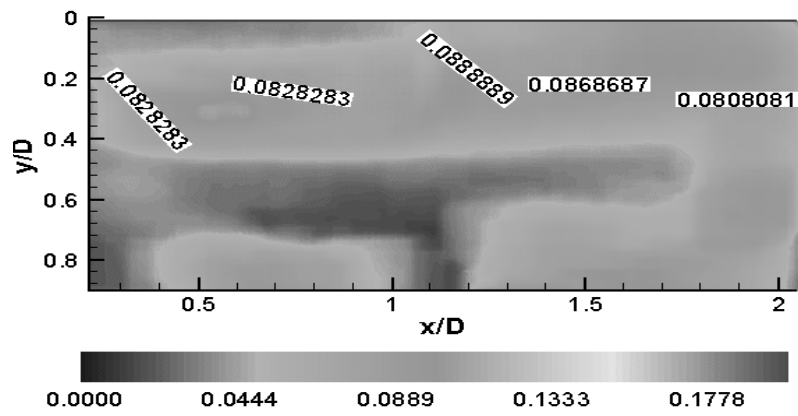


(b) Model C(Table 7.2 case ⑤)

Fig. 7.9 Mean velocity vector distributions.

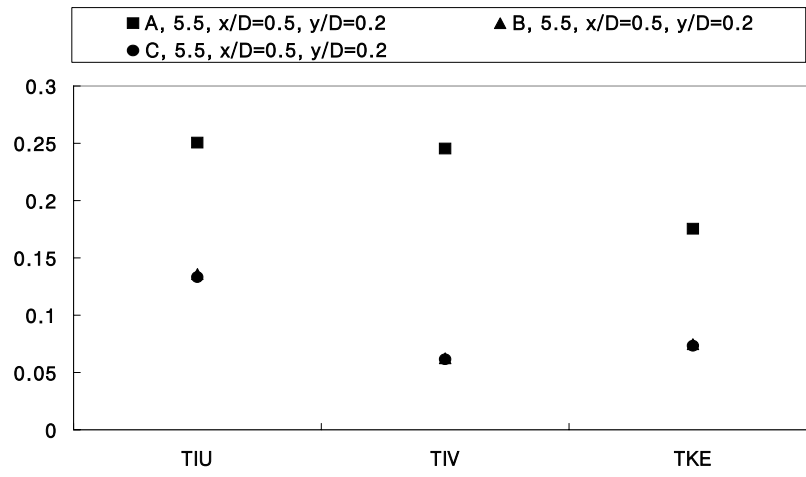


(a) Model B(Table 7.2 case ④)

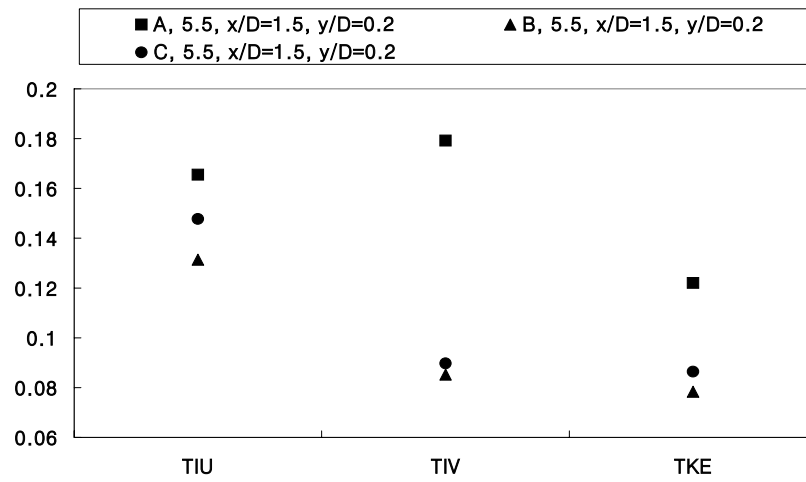


(b) Model C(Table 7.2 case ⑤)

Fig. 7.10 Turbulence kinetic energy distributions.



(a) at $x/D=0.5, y/D=0.2$



(b) at $x/D=1.5, y/D=0.2$

Fig. 7.11 Turbulence properties at points.

한편, Fig. 7.11은 Table 7.2상에 타원으로 표시되어 있는 실험조건에서의 난류특성량(u' 성분난류강도 $TIU = \sqrt{u'^2}/U_o$, v' 성분난류강도 $TIV = \sqrt{v'^2}/U_o$, 난류운동에너지 $TKE = (1/2) \cdot \sqrt{u'^2 + v'^2}/U_o$)들을 나타낸다. 흡입구직경 D 를 대표길이로 한 무차원 위치상에서 난동이 심하게 나타날 것으로 판단되는 임의의 두 지점 ($x/D=0.5$, $y/D=0.2$)과 ($x/D=1.5$, $y/D=0.2$)에서의 난류특성량을 비교하여 보았다. 이 그림에서도 볼 수 있듯이 상대적으로 유량이 많이 공급되는 모델 A에서의 결과가 유량이 상대적으로 유사한 모델 B, C에서의 결과보다 그 값을 달리하고 있음을 알 수 있다.

7.4 결론

실내기류특성조사를 위한 축소모델에 대한 정량적 유동가시화측정이 가능한 파노라마 PIV측정시스템을 구축하였다.

실내기류의 상사성은 레이놀즈수에 의하기 보다는 유량에 관계함이 확인되었다. 즉, 레이놀즈수가 서로 다르더라도 유량이 유사하면 유사한 유동패턴을 보임을 알 수 있었다.

실내기류 환기를 위한 흡입구 및 토출구의 크기가 서로 다르더라도 유량이 유사한 수준이면 유사한 유동패턴이 됨을 확인하였다. 일반적으로 무한 공간에 방출되는 제트유동의 경우 흡입구직경의 크기에 따라 유입되는 유동이 달라질 수도 있으나 본 연구에서는 이와 같은 현상이 나타나지 않았다. 즉, 모델별 흡입구 직경에 따른 유동패턴의 변화는 크게 나지 않았다. 이는

흡입구에서 방출되는 제트유동은 무한 공간이 아니라 배압이 작용하는 제한된 공간에 방출되는 관계에 기인하는 것으로 사료된다. 추후, 실내기류에 대한 모델실험을 할 경우에는 이를 참작하여야 할 것으로 사료된다. 한편, 축소모델에 공급되는 유량이 서로 유사할 경우 실내기류의 난류특성량의 분포는 유사한 분포를 보임을 알 수 있었다.

제 8 장 냉장고 실내 기류 측정

8.1 연구배경

가정용 냉장고의 성능개선에 대한 연구로서 소비전력과 소음저감이 대표적인⁽⁷⁰⁾⁽⁷¹⁾⁽⁷²⁾. 에너지 소비에 대한 제품의 규제가 전 세계적으로 강화되어 가고 있는 이후로부터 이와 관련한 연구들이 더욱 많이 시행되고 있다. 냉동실내 냉기온도의 균일하고 적절한 분포는 냉동실과 냉장실의 온도변화를 줄이고 음식물의 신선도를 증가시킬 뿐만 아니라 소비전력저감도 향상시킨다. 한편, 고객들의 생활수준향상은 단순한 냉장기기로서의 기능이 아니라 성능에 대한 관심 또한 불러일으켜 왔다. 특히, 빙결현상은 비교적 큰 불만 요소중의 하나로 되어 왔다. 지금까지의 냉장고 냉기공급을 위한 덕트시스템에 대한 연구는 시행착오를 거친 경험에 의하여 설계되어온 관계로 덕트시스템의 변경에는 많은 시간과 경비가 들었다. 이와 같이 냉동실의 결빙현상을 줄이기 위한 유로와 냉동실의 흡입 및 토출구 형상에 대한 설계를 위해서는 충분한 실험을 요하는 관계로 기존의 실험도구인 열선유속계, 레이저도플러 유속계 등에 의한 방법으로는 짧은 시간내에 시스템변경사양에 따른 유동특성을 파악하기란 어렵다.

오⁽⁷³⁾ 등은 460ℓ급 냉장고 내부형태를 단순화하여 수치해석에 의한 순환운동을 3차원적으로 재현하였고, 엄⁽⁷⁴⁾ 등은 냉장고의 냉동실내 냉기덕트 내부에 대한 유동해석을 실시하였다. 이⁽⁷⁵⁾ 등은 점계측(열전대 온도계측)에

의한 방법과 수치해석에 의한 방법을 동원하여 빙결현상메커니즘에 대한 고찰을 시도하였다.

열유체 유동에 예측에는 CFD (Computational Fluid Dynamics)에 의한 해석이 주류를 이루고 있으나, 냉장고와 같이 유로 및 형상이 매우 복잡할 경우에는 정확성이 많이 떨어지게 되므로 실험계측에 의한 방법에 의존할 수밖에 없다.

최근 미소입자를 유동장에 투입한 다음 광원과 카메라로 가시화한 영상으로부터 유동장의 속도분포를 얻어 낼 수 있는 PIV계측법⁽¹⁾⁽²⁾은 유동장 전체에 걸쳐서 속도분포를 얻어 낼 수 있다는 점, 시간변화에 따른 속도분포를 얻어 낼 수 있다는 점으로부터 공학의 다양한 분야에 적용이 되고 있으나 가전기기등과 같이 복잡한 형상의 유로를 지니는 경우에는 2차원적인 측정에 의존해왔다.

본 연구에서는 유동장 전체에 걸쳐 비정상유동특성을 정량화할 수 있는 PIV계측⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁷⁶⁾을 이용하여 냉동실의 흡입 및 토출구의 형상에 따른 유동특성조사를 실시하였으며 이를 바탕으로 냉동실의 결빙현상에 대한 정성적 및 정량적 고찰을 구현하고자 한다. 특히, 냉장고내부의 냉기류와 같은 유동장은 강한 3차원성을 지니고 있을 뿐만 아니라 냉장고 내부의 냉기순환조건에 따라 유동특성이 매우 복잡 다양하므로 수치계산에 의한 모사보다는 냉장고 내부 전체에 걸친 실험측정 해석이 더없이 요긴한 결과를 제공한다. 본 연구에서는 PIV측정을 통하여 실제 운전상태의 냉장고내의 냉기류의 3차원적 기류특성을 고찰함으로써 냉기류 토출구와 흡입구에 대한 설계요소를 개선하고 이를 통한 기류개선과 함께 결빙현상저감을 달성하고자 한다.

8.2 빙결

8.2.1 빙결의 메커니즘

Fig. 8.1은 빙결의 메커니즘을 개략적으로 나타낸 것이다. 냉동실이 운전 후 정상상태에 있다고 봤을 때 냉동실 문을 개방하게 되면 외부공기 중 수분(xx g) 성분이 냉동실에 들어오게 되는데 이는 증발기에서 부착된 후 제상(Defrosting)에 의하여 Drain으로 배출되는 량이다. 제상이 완전하지 못함에 기인한 수증기의 량($zz - xx$ g)과 냉동실로 들어 온 외부공기의 수분 중 일부가 증발기쪽으로 부착하지 아니하고 벽이나 내부 공간에 남게 되는 량(yy g)은 내부에서 '승화', '기화', '결빙'의 재순환 과정을 반복하게 된다. 따라서, 이들 내부에 존재하는 량($yy + (zz - xx)$ g)과 매번 도어(door)를 개방함으로 인하여 들어 온 수분량(xx g)의 합 ($xx + yy + (zz - xx)$ g), 즉, ($yy + zz$ g)이 증발기부착의 량과 냉동실 내부에 수분으로서 판단될 수 있는 량으로 된다. 냉동실 운전시에는 이와 같은 싸이클(cycle)이 반복되게 된다.

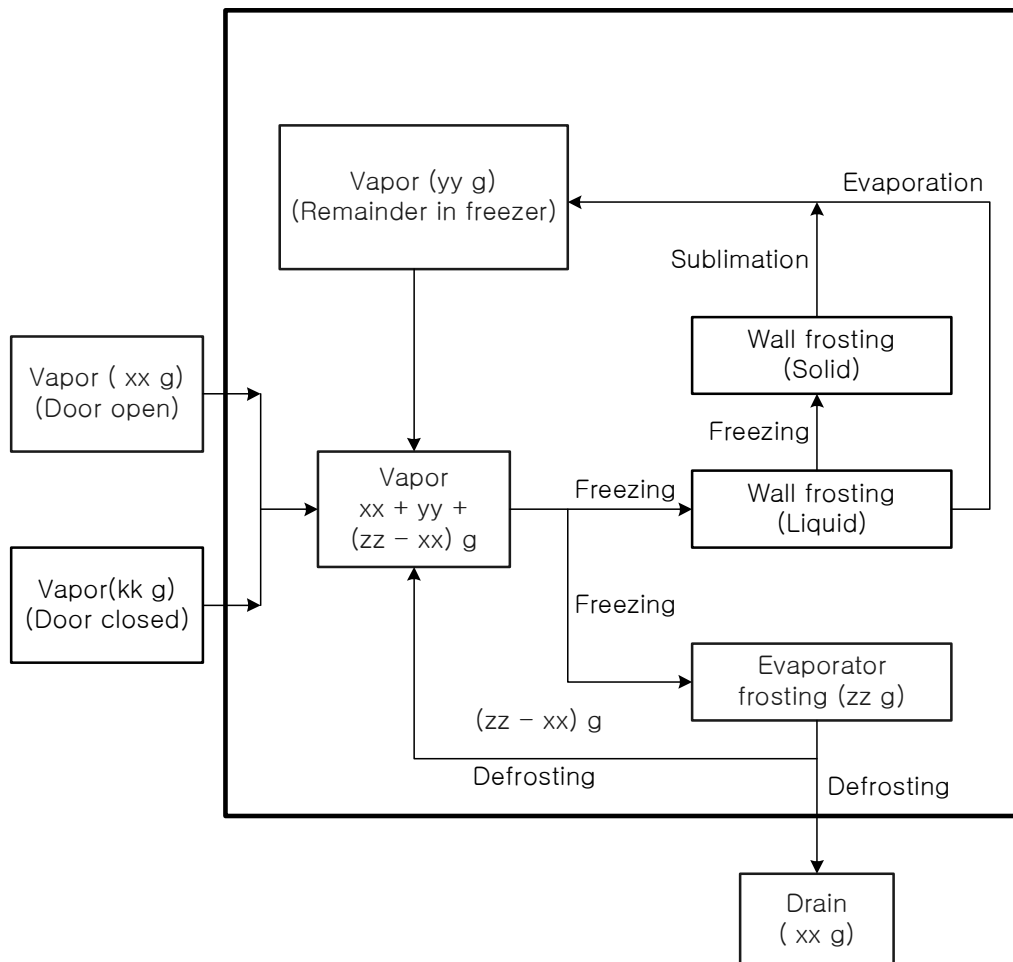


Fig. 8.1 Mechanism of freezing at the refrigerator.

8.2.2 냉동실 유동 특성과 빙결현상

냉동실 내부의 공기와 증발기로부터 나오는 냉기류와의 열 및 물질 전달량(heat and mass transfer)이 증가할수록 (냉기류 자체의 온도변화가 증가할수록) 빙결현상이 증가될 뿐만 아니라 물질전달에 의한 냉동실 내부의 음

식물 신선도가 상실된다.

냉동실 내부의 유동이 정체되는 곳에서는 주위에 통과하는 냉기류로 인하여 열 및 물질 전달률이 높으므로 결빙의 가능성이 다른 곳보다 높아지게 된다. 특히 도어개방 시에는 외기는 냉동실 내부에 순간적으로 확산되어 내부에 국소적으로 온도가 낮은 부위에서 착상되며 착상되지 못한 일부 공기 중의 수분은 실내에 존재하게 되며, 도어가 폐쇄된 후 운전상태로 되면 토출구와 흡입구의 형상에 따른 냉기류 특성이 형성하게 되는데 이들 유동특성이 정체적 유동을 형성(예를 들면, 순환 및 와 유동)시키는 곳에서는 결빙의 가능성이 높아지게 된다.

이는 냉기실내 벽면근처를 포함하여 실 내부전체에 대하여 정체적 유동이 발생하지 않도록 토출구 및 흡입구의 형상과 배치의 최적화 조건이 있음을 시사한다.

게다가, 냉동실 내부의 공기와 증발기와의 열 및 물질 전달률이 크지 않도록 하는 것이 결빙의 가능성을 줄이므로 토출된 냉기류는 빠른 시간내에 흡입구를 통하여 증발기로 갈 수 있도록 해 주는 것이 좋다. 이 때, 주의하여야 할 것은 빠른 시간 내에 빠져나가는 구조도 중요하지만 실내 기류가 정체되는 곳이 없도록 토출구 와 흡입구에 대한 설계를 하여야 할 뿐만 아니라 실내온도가 균일하도록 하여 열 및 물질 전달률이 적게 하여야 할 것이다.

특히, 벽면근처는 경계층 유동으로서 유동속도가 매우 느리므로 벽면유동속도를 빠르게 해 주든지 아니면 이 근처를 통과하는 기류의 온도가 벽면온도와의 차이가 적도록 하든지 하여야만 열 및 물질 전달률이 적게 되어

빙결의 가능성이 작아진다.

위의 내용들을 바탕으로 한 시급한 대책으로는, 냉동실 내부 기류와 증발기와의 열 및 물질 전달률을 감소시키기 위하여 냉동기 압축기의 운전시간을 짧게 함으로써 온도변화를 줄여야 할 것이며 팬으로부터 토출되어 냉동실 내부로 유입되는 유량을 증가시켜야 할 것이다. 다음으로는 토출구와 흡입구의 형상 및 배치구조를 변경시킴으로써 냉동실 내부의 냉기류 온도분포가 균일하고 냉동실 전체의 온도변화가 적도록 하여야 할 것이다.

8.3 실험방법

Fig. 8.2은 PIV계측을 위한 실험장치의 구성을 나타내고 있다. 냉동실의 빙결현상과 유동형상과의 관련을 PIV계측실험으로부터 얻기 위하여 총용량이 500 ℓ 급인 실제 냉장고를 사용하였다. 열전대에 의한 온도계측은 PIV실험과는 별도로 행해졌으며 이 결과는 냉동실의 흡입 토출구의 형상 및 덕트의 형상에 따른 냉기효율 평가에 이용되었을 뿐 유동형상에 따른 빙결현상의 논리전개는 본 보에서 기술하지 않기로 한다. PIV에 의한 계측결과를 유동의 특징에 따른 빙결현상의 유무판단에 적용하였으며 빙결현상의 실제 확인은 냉장고의 실제 운전을 통하여 이루어졌다. 냉동실의 실내 기류 가시화를 위하여 냉장고는 실제 운전중에 실험을 수행하였으며, 열전달의 손실을 최소화하기 위하여, 2중 단열 유리 및 발포성 폼을 이용하여, 측정영역을 완전히 밀폐시켰다. 입자로는 공기 중에 사용되는 올리브유(oil)와 스모그(smoke)를 동시에 사용하였다.

본 연구에서는 냉동실 후부 벽면 덮개에 설치되는 토출구의 형상과 수에 따른 내부 유동특성과 내부에 설치되는 램프하우스부근의 유동특성이 빙결 현상에 어떤 관계를 지니는가에 대한 정성적 평가를 내리고자 한다.

Fig. 8.3는 유동특성을 조사하기 위한 관측부를 나타내고 있다. 실제 운전상태에서 실내외와의 열관류량을 최대한 줄이면서 가시화가 될 수 있도록 전술한 바와 같이 투명 단열유리창을 상부벽면과 도어로부터 봤을 때 좌측 벽면에 설치하였다. 관측영역은 그림에서와 같이 Section 1에서 Section 6로 하였고 좌측벽면으로부터 위치는 각각 9cm, 17cm, 20cm, 26cm, 31cm, 59cm이다. Section 7, 8은 천정 가시화 창으로부터 각각 5cm, 27.5cm에 있다. 냉동실내 선반 및 제빙서랍 역시 아크릴을 사용하여 실제제품과 동일한 크기로 제작하였다. 한편, Section 5의 관측영역 상부에는 램프카버가 통과하는 곳이다. 후부 벽면 상부에 설치되는 토출구가 3개인 경우와 4개로 한 상태에서 내부유로를 확장시킨 경우에 대하여 유동특성을 조사하였다. PIV 계측을 위하여 계조치상호상관법⁽²⁾⁽⁷⁶⁾을 적용하였다.

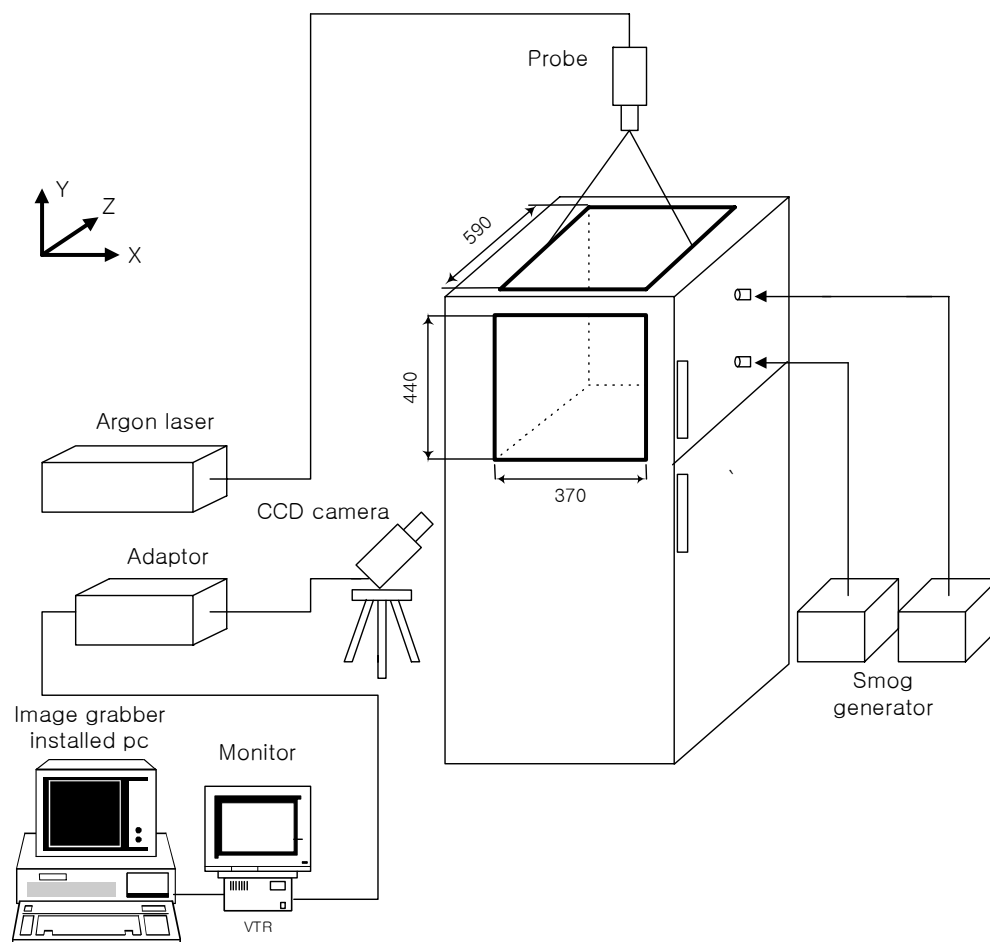


Fig. 8.2 Measurement system.

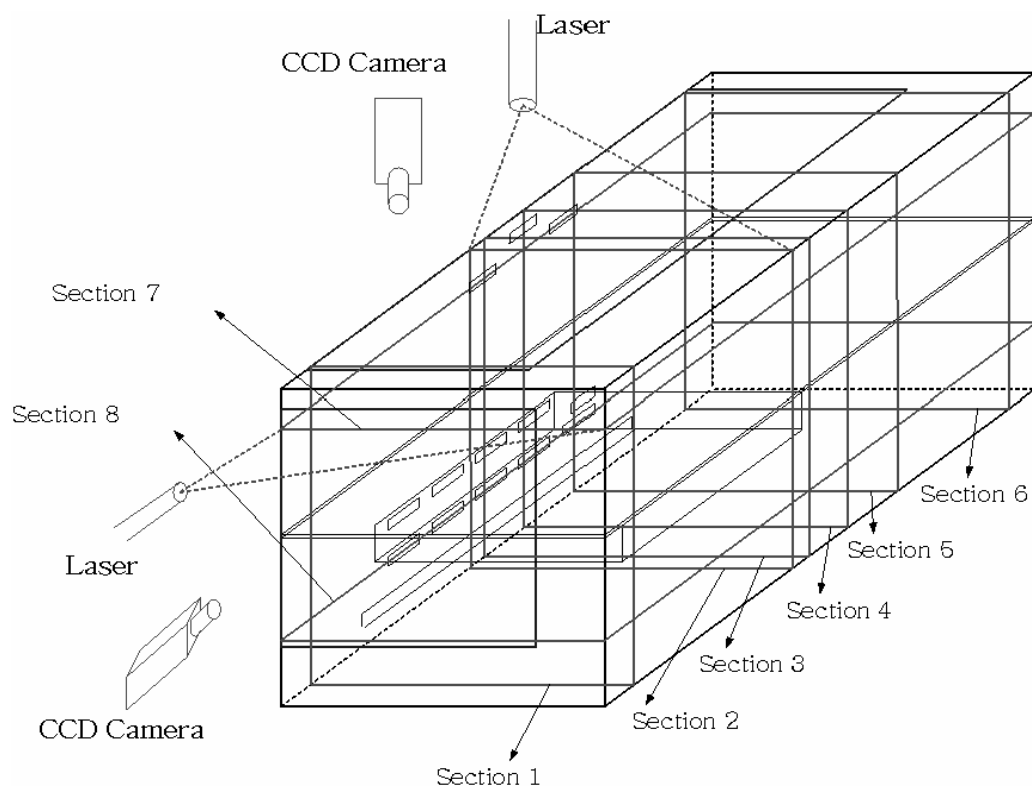
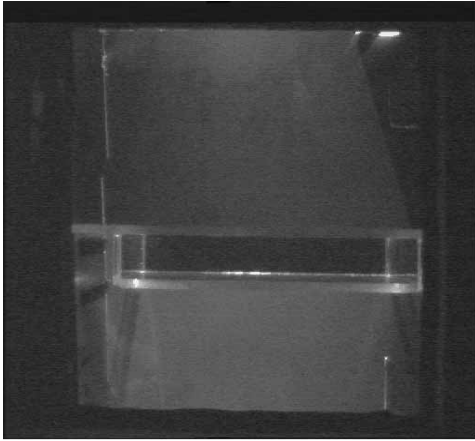


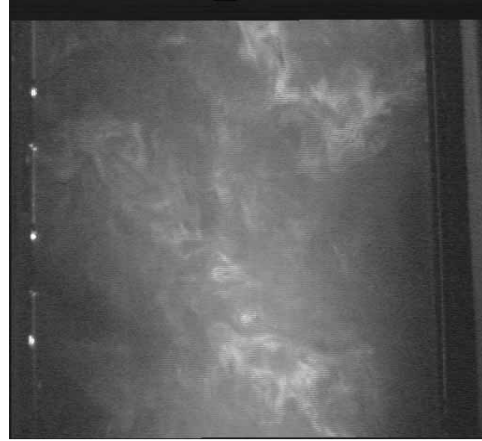
Fig. 8.3 Measurement sections.

8.4 실험결과

Fig. 8.5(a)와 (b)는 Fig. 8.4의 4-1단면(Fig. 8.3의 Section 4)에서의 냉동실내 기류를 가시화 측정한 결과를 나타낸다. 유동특성을 평가하기 위하여 128장의 순간유동장을 평균한 결과를 이용하였다. Fig. 8.5(a)와 (b)는 후부 벽면의 토출구가 3개인 경우와 4개로 하고 유로확장인 경우 상부 토출구 중앙에 해당하는 Section 4에서의 평균속도를 보여주고 있다. Fig. 8.5(a)에서 보이는 바와 같이 상부 토출구에서 강하게 냉기가 유입되어 천장부를 통해서 도어 벽면에 충돌한 후 방향이 바뀌어서 선반을 타고 이동한다. 이 냉기는 다시 루버벽면을 타고 토출구로 이동하며, 토출냉기와 만나서 재순환을 이루므로 인하여 냉동실 상부에 커대한 와가 생성됨이 보인다. 이와 같은 유동의 경우 도어벽면부 포켓부의 저속영역부와 도어 상부측에 충돌되는 고속 냉기류가 만나는 부근에서(그림의 화살표 표시부) 열 및 물질전달률의 향상을 초래하게 되므로 빙결가능성을 높이게 된다. 하부 냉기팬으로부터 토출구까지 유로를 확장시킨 경우 선반하부벽면을 따라 제트기류가 형성됨이 보인다. Fig. 8.5(b)는 추가된 토출구와 확장된 유로의 경우 유동특성을 보이고 있다. 유동형상은 Fig. 8.5(a)의 경우와 유사하나 유입량과 순환속도는 증가하였음이 보인다. 하부유동의 경우는 토출유속이 매우 빨라져 있음이 보인다. 상 하부 모두 강한 순환냉기가 형성되고 있는데 이 순환냉기가 지나가는 곳 근처에 저속부위에서는 빙결 가능성이 더욱 높아지게 된다.



(a) Section 4-1

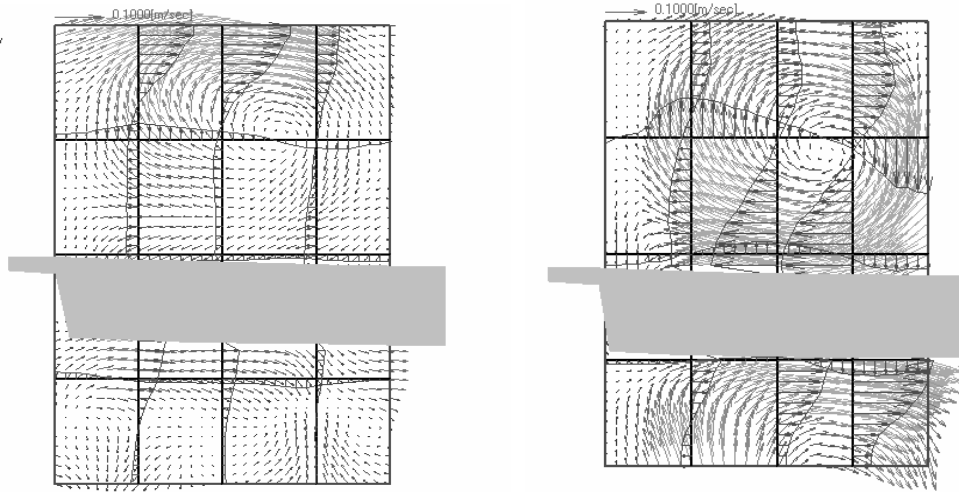


(b) Section 7-1



(c) Section 8-1

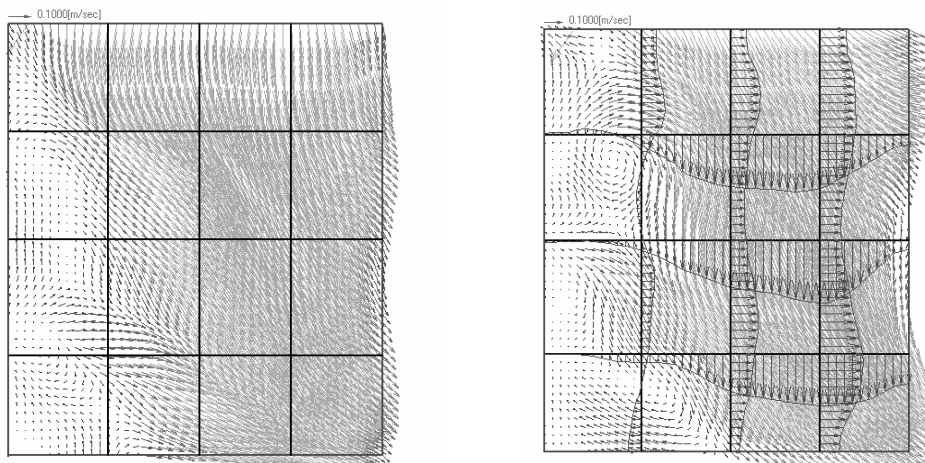
Fig. 8.4 Experimental images for each section.



(a) Original Model

(b) Modified Model

Fig. 8.5 Results at Section 4-1.



(a) Original Model

(b) Modified Model

Fig. 8.6 Results at Section 7-1.

Fig. 8.6(a)와 Fig. 8.6(b)는 Fig. 8.4의 7-1단면(Fig. 8.3의 Section 7)에서의 냉동실내 기류를 가시화한 결과를 나타내는데 (a)는 상부 토출구 후부벽면형상 변경전을 (b)는 변경후의 상부 토출구에서의 수평방향의 냉기유동을 계측한 평균속도장을 나타낸다. 후부벽면 상부에 토출구가 추가되기 전에는 2개의 토출구에서 토출되는 냉기가 토출구 가까이에서는 수직으로 토출되다가 냉동실 문까지는 전체적으로 경사의 유동이 형성되고 있음이 보인다. 이는 냉동실벽면(우측벽, 그림에서 위쪽면)을 따라 순환되어 오는 냉기에 의하여 토출된 냉기가 그림의 좌측 상단에서 우측 하단으로 경사방향으로 흐름을 의미한다. 이는 냉동실내부의 유동이 전반적으로 강한 3차원 와류동임을 암시한다. 상부 토출구를 한 개 더 추가함으로써 변경전 루브에 의한 패턴과는 다소 차이가 있는데 이는 토출량의 증가로 경사방향으로의 유동이 다소 감소되었으며, 토출구에서의 냉기가 토출방향으로 균일하게 이루어짐이 확인되었다. 이는 토출구에서 유입된 냉기가 냉동실 문쪽으로 도달한 뒤 곧바로 문쪽 벽면을 따라 하부로 흐른 뒤 일부는 문쪽 포켓으로 나머지는 재차 순환되는 유동형태임을 암시한다.

Fig. 8.7(a)와 Fig. 8.7(b)는 Fig. 8.4의 8-1단면(Fig. 8.3의 Section 8)에서의 냉동실내 기류를 가시화한 결과를 나타내는데 (a)는 하부 토출구 후부벽면형상 변경전을 (b)는 변경후의 하부 토출구에서의 수평방향의 냉기유동을 계측한 평균속도장을 나타낸다. Fig. 8.7(a)에서 냉동실 우측벽면(그림에서 위쪽면)으로부터 나온 유동은 후부벽면의 토출구로부터 나온 강한 제트기류와 합류하는 유동을 만들며 이 유동에 의하여 우측벽면 부위에 반시계 방향의 순환유동을 발생시키고 있음이 보인다. 이 순환유동이 발생

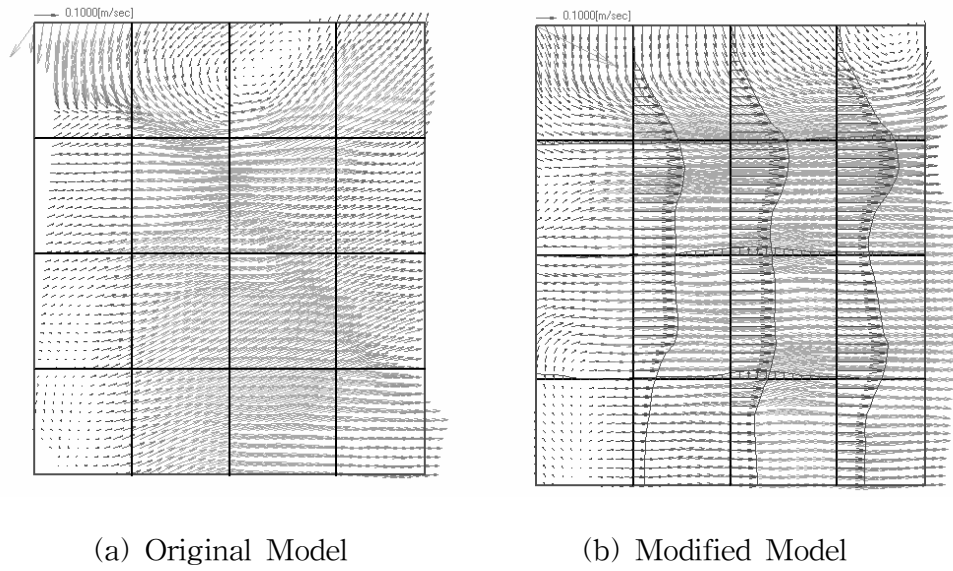


Fig. 8.7 Results at Section 8-1.

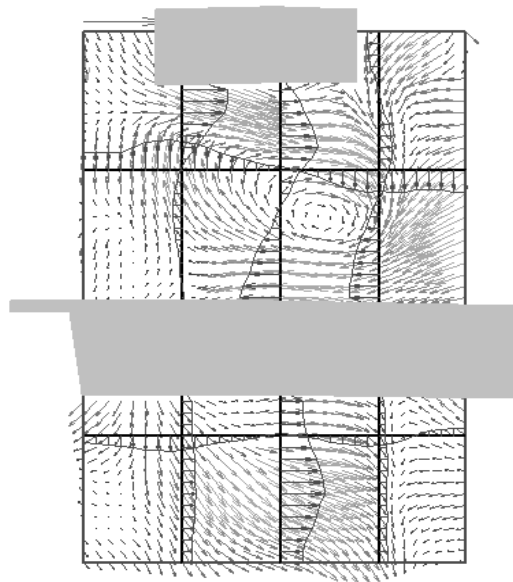


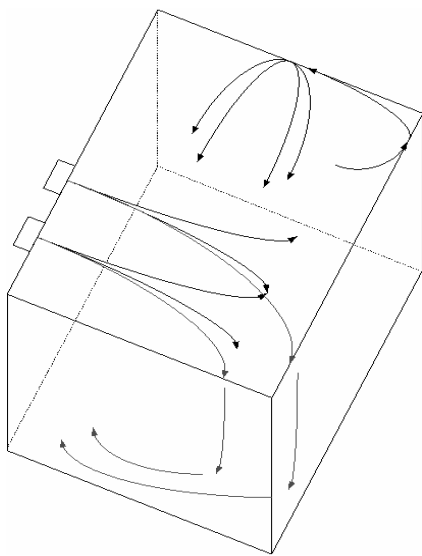
Fig. 8.8 Mean velocity field at the Section 5 with the lamp house.

하는 벽면에서는 순환유동의 바깥쪽으로 통과하는 토출구로부터 막 나온 차가운 냉기류에 의하여 빙결발생 가능성이 매우 높아지게 된다. Fig. 8.7(b)는 변형된 루버의 경우의 결과를 나타낸다. 후부 벽면 하부 토출구에 설치된 스크린을 일부 제거하여 유로를 확장함으로써 토출량이 증가함으로써 벽면에 순환되는 부위가 없어짐이 보인다. 이는 전술의 빙결가능성 배제를 의미한다.

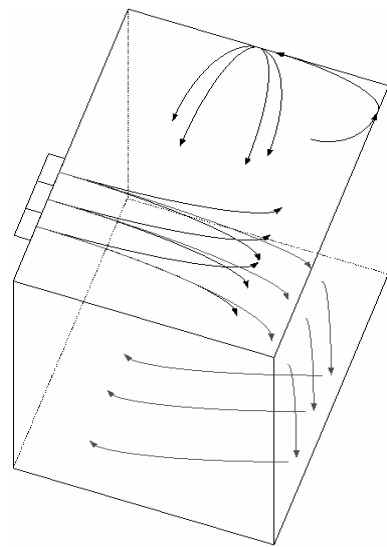
Fig. 8.8는 냉동실내 램프커버가 설치되었을 때 냉동실 내부에 형성된 냉기 유동형태를 보이고 있다. 냉동실문과 램프커버 사이에서 정체와가 형성되는 곳(그림에서 위쪽 화살표부분)을 볼 수 있는데 이 와의 바깥쪽에 토출구로부터 나온 저온의 냉기(그림에서 아래쪽 화살표부분)가 통과하게 되면 이 냉기류와 정체와 사이에서 열 및 물질전달률 향상으로 인하여 램프커버 후부에 결빙의 가능성을 높이게 되는 원인이 된다. 이는 실제 눈으로도 확인된 사항이다. 아울러, 실제 냉동실의 운전을 통하여 냉동실 내부벽면에 빙결이 되는 현상이 목격되었는데 이는 냉동실의 문개방에 의하여 유입된 고온다습의 공기와 냉동실의 운전모드에서 나온 냉기와의 온도차에 의하여 전술의 유동형상에 따른 국소적 빙결현상이 유발되고 있음이 추정되었다.

Fig. 8.9(a)와 Fig. 8.9(b)는 루버형상 변경 전과후의 상부 토출구에서 나온 냉기류의 유동경로를 본 연구의 실험을 통하여 얻어낸 개략도이다. (a)는 상부에 토출구가 2개인 경우를 보인다. 토출된 냉기가 냉동실내 순환냉기(우측벽면에서 좌측으로 내려오는)와 충돌하여 토출된 냉기가 좌측벽면 방향으로 심하게 물리고 있음이 보인다. (b)는 추가된 토출구로부터 토출된 냉기의 증가에 의하여 상대적으로 밀려 내려오는 냉기보다 좌측벽면방향으

로 물리는 정도가 다소 낮으며 균일한 냉기류가 형성되고 있음이 확인되었다. 이러한 유동형상으로부터 (a)의 경우가 (b)의 경우보다 좌측벽면에 빙결 발생현상이 높음이 추정된다.

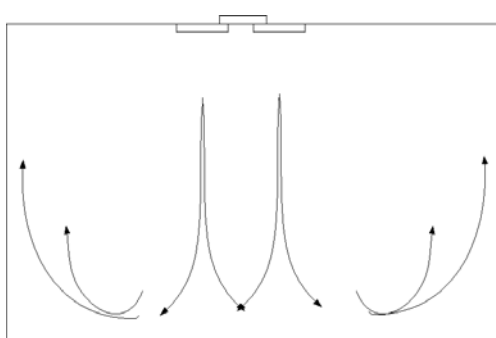


(a) Original Model

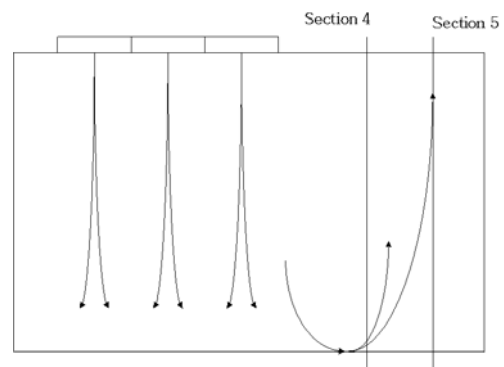


(b) Modified Model

Fig. 8.9 Three-dimensional flow patterns in the upper room.



(a) In the upper part room



(b) In the lower part room

Fig. 8.10 2D Flow patterns of the original louver.

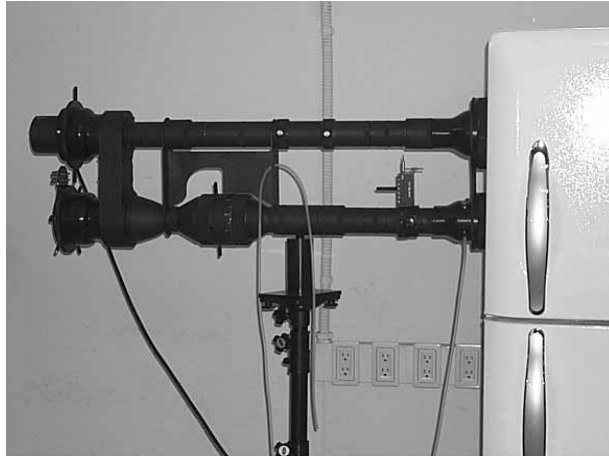


Fig. 8.11 Volume flow measurement system.

Table 8.1 Volume flow measurement.

	Original louver	Modified louver
Volume flow [m^3/min]	38	42

Fig. 8.10(a)와 Fig. 8.10(b)는 냉장고 상부와 하부에서의 후부벽면형상 변형전의 냉기유동의 패턴을 2차원으로 간략화 한 것이다. 후부벽면의 토출구로부터 나온 냉기류는 많은 부분이 문쪽으로 향한 뒤 문에서 부딪힌 후 후부벽쪽을 향하여 되돌아가는 경향을 보였다. 이는 기류가 도어에 부딪힘으로 인한 속도운동에너지 손실을 초래할 뿐만 아니라 부딪히는 부위에 정체성유동(포켓에 의한 국부순환)이 존재한다면 그 부위의 결빙의 가능성을 높게 됨을 의미한다.

Fig. 8.11은 실제 냉동실내의 유량을 측정하기 위한 장치이며, 원모델과 개선모델간의 유량 측정 결과는 Table 8.1에 제시하였으며, 그 결과 개선모델의 유량이 $4 \text{ m}^3/\text{min}$ 증가하였음을 확인하였다.

한편, 토출구로부터 나온 기류가 냉동실 문쪽으로 필요이상으로 충돌이 되는 것은 냉동실 전체의 평균적 순환을 유발하게 됨을 의미하며 이는 냉동실로부터 빠져 나온 기류의 단위시간당 증발기 통과유량을 감소시키는 결과를 초래하게 됨을 의미한다. 이는 냉동기의 부하증가로 나타날 뿐만 아니라 냉동실내부와 증발기와의 온도차를 크게 하는 원인으로 작용하여 결국에는 병결의 원인을 제공하게 된다. 두 경우 모두 토출부의 위치만 다를 뿐 거시적으로 볼 때는 토출에 의해서 냉동실문에 충돌후 충돌위치에 따라 좌우벽면으로 반사됨이 확인되었다. 이로 인하여 좌.우측 벽면과 중앙단면에서는 2차원성 기류들이 충돌에 의해서 3차원성 기류를 형성하며 벽면으로 가까이 갈수록 2차원성 기류를 형성하게 된다. 또한, 벽면에 가까이 갈수록 유동이 느려지며 순환이 거의 이루어지지 않음이 확인되었다. Section 4, Section 5의 경우에서 얻어진 결과로부터 토출구에서 토출된 2차원성 제트기류가 문쪽 벽면에 충돌된 후 반사되어 나오는 기류가 지배적임이 확인되었다. 이상의 결과들로부터 냉동실로부터 빠져나온 기류가 단위시간당 증발기로의 통과량을 증가시킬 수 있는 실내의 최적 형상설계가 필요함이 확인되었다.

8.5 결론

PIV계측기법을 이용한 냉동실 내부 기류유동가시화 실험을 통하여 냉기류의 유동특성을 정량화 조사하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

PIV계측결과를 이용하여 빙결메커니즘에 대한 정성적 및 정량적 평가기법을 구현하였다. 냉동실내부 램프카버 후부에 강한 국소적 와류가 형성되고 있음이 확인되었다. 이는 냉동실 토출구로부터 나온 냉기류가 이 국소적 와류를 통과하게 되면서 그 부위에서는 빙결현상이 현저하게 나타나게 될 것을 의미한다. 냉동실내부 측벽면에 저속유동이 형성된 곳에 냉기류가 통과하는 경우에는 빙결현상이 두드러지게 나타나게 되는데 PIV계측결과를 이용하여 이들 저속유동이 형성되는 곳을 체계화 할 수 있었다. PIV계측결과를 토대로 빙결현상을 억제할 수 있는 냉기유동에 대한 고찰을 체계화할 수 있는 방안을 확립하였다.

제 9 장 결론

다차원 이미징 측정법(4D PTV, SPIV, SPTV)을 구축하여 구의 후류 유동장, 충돌분류 유동장과 같은 공학기초분야에의 측정에 성공적인 적용을 통하여 각 유동장에 대한 실험적 데이터베이스를 구축하였다. 또한 유체-구조 연동운동 동시측정시스템(FSIMS)의 구축과 이에 대한 성능검정을 통하여 FSIMS의 타당성을 확인하였고, 이를 이용하여 탄성판 충돌 유동장에 대한 탄성판의 운동과 충돌분류 유동에 대한 동시측정 실험 데이터베이스를 구축하였다.

한편, 건축물 공조시스템의 실내기류 측정에의 적용을 위하여 파노라마 PIV측정법을 구축하였으며 이를 이용한 실험측정을 통하여 이미징 측정법에 의한 건축물 실내기류 해석요건을 제시하였다. 또한 2차원 이미징 측정법(2D PIV)을 이용하여 실 운전상태의 냉장고 내부에서 발생하는 결빙현상에 대한 정량적 평가법을 확립하였다.

이상의 결론을 도출하는 과정에서 정리될 수 있는 구체적인 결과는 다음과 같이 정리될 수 있다.

1. 4D PTV측정시스템을 구축하였으며 구의 후류 유동장에 발생하는 와유동 구조를 형상화하기 위하여 측정으로부터 얻어진 속도벡터 텐서에 대한 고유치해석법을 완성하였다. 고유치해석법 및 와도분포해석에 의하여 구의 후류 와구조는 내부 셀과 외부 셀로 구성되

는 이중 셀의 구조를 가지고 있음이 확인되었다. 외부 셀인 와환(vortex loop)은 시계방향 혹은 반시계 방향으로 회전하면서 하류 방향으로 대류되어 감이 확인되었다. 헤어 핀(hair pin)형상의 내부 셀의 와구조는 주기적으로 수평 및 수직방향으로 교호적으로 회전됨이 확인되었고, 수평의 쌍으로 나타났다가 때로는 수직의 쌍으로 나타났다. 이는 선행 연구자들의 수치해석결과와도 일치하는 사항이다. 이중 셀의 발생은 구 후류 내부와 외부 유동의 경계에 존재하는 강한 전단층(shear layer)의 존재에 기인하는 것으로 사료된다. 한편, 구 후류 유동에 대한 보다 세밀한 관찰을 위하여 SPIV와 SPTV에 의한 측정을 수행한 결과 위의 내부 셀의 운동은 S자형 운동을 하고 있음이 확인되었다. 이는 아직 보고 된 바가 없는 흥미 있는 결과로 사료된다. SPIV에 의한 결과는 SPTV에 의한 결과보다 구의 유동현상을 잘 대변하고 있음이 확인되었다. 이론상으로는 SPTV가 SPIV보다 난류운동에 대하여 보다 정교하게 측정이 가능하다고 알려져 있으나, SPTV측정법의 실질적 적용에 있어서 카메라해상도의 제약과 입자투입밀도의 물리적 한계, 불규칙으로 분포되어 있는 속도벡터의 격자상 보간에 있어서 발생하는 보간 오차 등의 문제로 공간해상도가 SPIV보다 상대적으로 떨어지게 된 것에 기인하는 것으로 사료된다.

2. 구축된 4D PTV측정시스템에 의한 충돌분류에 대한 측정결과, 노즐로부터 나온 응집 와구조는 충돌판을 향하여 일정간격으로 대류

되어 가다가 충돌판에 부딪치는 상태에 따라서 부딪친 후 와환으로 발전하거나 부딪치기 전의 응집구조의 형태로 발전하는 현상이 확인되었다. 충돌판에서 가장 가까운 와환(vortex ring)은 충돌판으로부터 0.9D의 위치에 존재함이 확인되었는데 이는 기존의 측정결과와 일치한다. 한편, 분류유동장 측정에 있어서 4D PTV를 적용하기 위해서는 유동장의 최대 주파수보다 높은 주파수로 측정 가능해야 하며 공간해상도도 Kolomogrov 스케일 수준이하이어야 한다. 유동장의 Kolomogrov 시간스케일은 $\tau=(\epsilon/\nu)^{1/2}$ 로 표시될 수 있는데 본 연구에서는 점성산일(viscous dissipation, ϵ)량은 약 $0.0075 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 이므로 사용된 유체가 물이므로 $\nu=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 에서 $\tau = 0.012 \text{ s}$ (12 ms) 이 된다. 이는 사용된 고해상 고속카메라의 시간해상도 $\Delta t = 0.5 \text{ ms}$ 보다 작은 관계로 유의하다고 할 수 있다. 또한 Kolomogorov 길이스케일은 $\eta=(\nu^3/\epsilon)^{1/4}= 0.11\text{mm}$ 로 되어 4D PTV에서 속도장을 얻는데 사용된 셀크기 3.3mm 보다 작은 관계로 정확하게는 Kolomogrov 길이스케일 수준은 아니지만 이 보다 다소 큰 와유동에 대해서는 유의하다고 할 수 있다. 따라서 추후 카메라의 공간해상도를 향상시킴으로써 완전한 4D PTV측정시스템의 실용성이 배가된다고 할 수 있다.

3. 구축된 유체-구조 연동운동 동시측정시스템(FSIMS)에 의한 $x/D=4.0$ 인 탄성체 돌발 충돌분류에 대한 측정결과, 탄성판의 초기 운동 개시는 노즐로부터 유체가 분출되어 나오는 시기와 같음이

확인되었는데 유동이 분출시에 탄성관은 오히려 반대로 운동함이 확인되었다. 이는 노즐로부터 나오는 질량유량의 증가에 따른 탄성관 표면근처에서의 유량이 빠져나갔음을 의미한다. 또한, 탄성관 정체점(stagnation point)에 도달한 와(vortex)는 벽면 상부를 따라 외곽으로 빠져나갔는데 이는 비탄성 벽면의 경우에서 보이는 와의 $r/D=1.0\sim 1.5$ 근처에서 나타나는 와의 박리현상(separation)과는 다른 양상이었다.

4. 파노라마 PIV측정법을 이용하면 대형 건축물의 공조시스템 모델실험이 가능함이 확인되었다. 또한 건축물의 모델 실험시에 Re수가 1000이상에서는 실물과의 기류 상사에는 Re수와는 무관하며 오히려 유량에 관계함이 확인되었다. 따라서 건축물 실내기류에 대한 상사실험을 수행하고자 할 때에는 모델로의 흡입 및 토출의 유량비를 정확히 맞추어 줄 필요가 있다.

5. 2D PIV 측정법을 이용한 실 운전상태의 냉장고 냉동실내 기류 측정을 통하여 고내의 결빙현상은 고내에 존재하게 되는 국부적 순환유동에 기인함을 확인하였다. 또한 고내의 결빙현상을 줄이기 토출된 냉기와 고내에 순환하고 있는 기류와의 온도차를 줄이기 위한 내부 형상을 구성해야 함을 확인하였다. 이와 같은 사실들을 바탕으로 냉동고 내의 결빙현상을 줄일 수 있는 냉기류의 최적화 모델을 제시하였다.

본 연구에서 개발 및 구축된 다차원 이미징 측정법은 시간해상도와 공간 해상도를 극복할 수 있는 하드웨어시스템과의 접목을 통하여 추후 열·유체 시스템 기기산업을 포함한 다양한 산업분야에서 제품개발 및 성능향상에 필요한 주된 측정법으로서 자리 매김할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Adrian R. J., 1991, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 261~304.
- (2) Utami T. and Blackwelder R., 1991, "A Cross Correlation Technique for Velocity Field Extraction from Particulate Visualization". *Exp. in Fluids*, Vol. 10, pp. 213~223.
- (3) Stanislas, M., Okamoto, K. and Kaehler, C., 2003, "Main Results in the 2nd PIV Challenge", PIV-Challenge, 2003, 12, Busan, Korea.
- (4) Prasad A. K. and Adrian, R. J., 1993, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry Applied to Liquid Flow", *Experiment in Fluids*, Vol. 15, pp. 49~60.
- (5) Lecerf, A., Renou, B., Allano, D., Boukhalfa, A. and Trinite, M., 1999, "Stereoscopic PIV: Validation and Application to an Isotropic Turbulent Flow", *Experiments in Fluids*, Vol. 26, pp. 107~115.
- (6) Yoon, J. H. and Lee, S. J., 2002, "Direct Comparison of 2D PIV and Stereoscopic PIV Measurements", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, pp. 1631~1642.
- (7) 도덕희, 황태규, 2004, "표준화상을 이용한 2차원 PIV와 3차원 PIV

- 성능시험," 대한기계학회지, Vol. 28, No. 11, pp. 1315~1321.
- (8) Okamoto, K., Nishio, S. and Saga, T., 1999, "Evaluation of the 3D-PIV Standard Images(PIV-STD Project)", *Proc. The Third International Workshop on PIV'99*, Santa Barbara, U.S.A..
 - (9) 도덕희, 이원제, 조경래, 편용범, 2002, "스테레오 PTV", 대한기계학회춘계학술대회논문초록집, 2002. 5.22-24, 용평리조트, p.152, CD-ROM Proc. Paper No. 02S305.
 - (10) 도덕희, 이원제, 조용범, 편용범, 2003, "스테레오 PTV법의 개발", 한국가시화정보학회지, Vol. 1, No. 1, pp. 92~97.
 - (11) 도덕희, 이원제, 조용범, 편용범, 백태실, 하승운, 2002, "스테레오 PIV와 스테레오 PTV에 의한 실시간 난류통계량 계측", 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집 I, 2002, 6, 27-29, 용평리조트, pp. 120~125.
 - (12) Mass, H. G., Gruen, A. and Papantoniou, D. A., 1993, "Particle Tracking Velocimetry in Three-dimensional Flows, Part 1 Photogrammetric Determination of Particle Coordinates", *Experiments in Fluids*, Vol. 15, pp. 133~146.
 - (13) Doh, D. H. Kim, D. H., Choi, S. H., Hong, S. D., Kobayashi, T. and Saga, T., 2000, "Single-Frame 3D PTV for High Speed Flow", *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp. 85~98.
 - (14) 조경래, 2002, "유전알고리즘 기반의 3D PTV법의 개발에 관한 연구", 한국해양대학교, 석사학위논문.

- (15) Doh, D. H. Kim, D. H., Cho, K. R., Cho, Y. B., Saga, T. and Kobayashi, T., 2002, "Development of Genetic Algorithm based 3D-PTV Technique", *Journal of Visualization*, Vol. 5, No. 3, pp. 243~254.
- (16) 황태규, 2003, "3차원 PTV에 의한 구의 후류 유동장 해석에 관한 연구", 한국해양대학교, 석사학위논문.
- (17) Doh D. H., Hwang T. G. and Saga T., 2004, "3D-PTV Measurements of the Wake of a Sphere", *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, No. 6, pp. 1059~1066.
- (18) Hwang, T. G., Doh, D. H. and Okamoto, K., 2005, "4D-PTV", *Journal of Visualization*, Vol. 8, No. 3, (to be printed).
- (19) Cziesla, T., Biswas, G., Chattopadhyay, H. and Mitra, N. K., 2001, "Large-eddy Simulation of Flow and Heat Transfer in an Impinging Slot Jet", *Int. Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 22, pp. 500-508.
- (20) Ellen, C. H. and Tu, C. V., 1984, An analysis of jet stripping of liquid coatings, *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 106, pp.399~404.
- (21) Phares, D. J., Smedley, G. T. and Flagan, R. C., 2000, "The Wall Shear Stress Produced by the Normal Impingement of a Jet on a Flat Surface, *J. Fluid Mech.*, Vol. 418, pp. 351~375.
- (22) Choi. H., 2000, "Splitting Method for the Combined Formulation of the Fluid-particle Problem", *Computer Methods in Applied*

- Mech and Eng.*, Vol. 190, No. 11/12, pp. 1367~1378.
- (23) Hu, H. H. and Joseph, D. D., 1992, "Direct Simulation of Fluid Particle Motions", *Theoret. Comput. Fluid Dynam.*, Vol. 3, pp. 285~306.
 - (24) Hu, H. H., 1996, "Direct Simulation of Flows of Solid-liquid Mixtures", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, pp. 335~352.
 - (25) Choi, H. G. and Joseph, D., 2001, "Fluidization by Lift of 300 Circular Particles in Plane Poiseuille Flow by Direct Numerical Simulation", *J. Fluid Mech.*, Vol. 438, pp. 101~128.
 - (26) 도덕희, 조효제, 상지웅, 황태규, 조용범, 편용범, 2004, "디지털영상 처리기술을 이용한 비접촉식 유체-구조물 연동운동 3차원 측정시스템 개발에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제18권 제4호, p1~7.
 - (27) Kobayashi T., Saga T., Haeno T. and Tsuda N., 1991, "Development of a Real-time Velocity Measurement System for High Reynolds Fluid Flow using a Digital Image Processing Design", In: *Experimental and Numerical Flow Visualization (Ed Khalighia B et al.)*. ASME FED Vol. 28, pp. 9~14.
 - (28) Doh, D.H., 1995, "A Study on Three-dimensional Particle Imaging Thermometry and Velocimetry using Liquid Crystal", Ph.D. Thesis, The Univ. of Tokyo, Japan.
 - (29) Prasad, A. K. and Jensen, K., 1995, "Scheimpflug Stereocamera for Particle Image Velocimetry in Liquid Flows", *Applied Optics*,

Vol. 34, No. 30, pp. 7092~7099.

- (30) Soloff S. M., Adrian R. J. and Liu Z. C., 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 8, pp. 1441~1454.
- (31) Willert, C., 1997, "Stereoscopic Digital Particle Image Velocimetry for Application in Wind Tunnel Flows", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 8, pp. 1465~1479.
- (32) 도덕희, 황태규, 2004, "표준화상을 이용한 2차원 PIV와 3차원 PIV 성능시험", *대한기계학회지*, Vol. 28, No. 11, pp. 1315~1321.
- (33) Nishino, K., Samada, M., Kasuya, K. and Torii, K., 1996, "Turbulence Statistics in the Stagnation Region of an Axisymmetric Impinging Jet Flow", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 17, pp. 193~201.
- (34) Ikeda, K., Okamoto, K. and Murata, S., 2003, "Development of Dynamic Digital Holographic Particle Velocimetry", *Proc. of PIV03*, Busan, Korea, Paper No. 3103.
- (35) Doh, D. .H., Cho, Y. B., Lee, W. J., Kim, D. H., Saga, T., Segawa, S., and Kobayashi, T., 2002, "Measurements of a Round Jet with a High-resolution 3D-PTV", *Proc. of 10th ISFV*, Kyoto, Paper No. F0313.
- (36) Tenneks, H. and Lumley, J. L., 1990, "A First Course in Turbulence", *The MIT Press*, 13th Printing.

- (37) K. Okamoto, S. Nishio, T. Saga and T. Kabayashi, 2000, "Standard Images for Particle-Image Velocimetry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, pp. 685-691.
- (38) Willert, C. E. and Gharib, M, 1991, "Digital Particle Image Velocimetry," *Experiments in Fluids*, Vol. 10, pp. 181-193, 1991.
- (39) Tso, J., 1983, "Coherent Structures in a Fully-Developed Turbulent Axisymmetric Jet, PhD Dissertation, Johns Hopkins University.
- (40) Tso and Hussain, 1989 Organized Motions in a Fully Developed Turbulent Axisymmetric Jet, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 203, p.425.
- (41) Jeong, J. and Hussain, F., 1995, "On the Identification of a Vortex", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 285, pp. 69~94.
- (42) 유해영, 이강섭 공역, 공학도를 위한 수치해석, 2판, 회중당, pp.713~744.
- (43) Ploumhans, P., Winckelmans, G. S., Salmon, J. K, Leonard, A., Warren, M. S., 2002, "Vortex Methods for Direct Numerical Simulation of Three-dimensional Bluff Body Flows: Application to the Sphere at $Re=300$, 500, and 1000," *J. of Computational Physics*, Vol. 178, pp. 427~463.
- (44) Gushchin, V. A., Kostomarov, A. V., Matyushin, P. V. and Ravlyukova, E. R., 2002, "Direct Numerical Simulation of the

- Transitional Separated Fluid Flows Around a Sphere and a Circular Cylinder", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, pp. 341~358.
- (45) Miyazaki, K. and Bedeaux, D., 1995, "Diffusion of a Sphere in Homogeneous Flow", *Physica A*, Vol. 219, pp. 39~55.
 - (46) Carlos, R. T. Ochoa, J., Castillo, J. E. and Hanazaki, H., 1999, "Numerical Simulation of Flow Past a Sphere in Vertical Motion within a Stratified Fluid," *J. of Computational and Applied Math.* Vol. 103, pp. 67~76.
 - (47) Arai, T., 1995, "A Note on Stokes' Solution for a Flow Past a Sphere", *Fluid Dynamics Research*, Vol. 16, pp. 109~113.
 - (48) Tomboulides, A. G. and Orszag, S. A., 2000, "Numerical Investigation of Transitional and Weak Turbulent Flow Past a Sphere", *J. Fluid Mech.*, Vol. 416, pp. 45~73.
 - (49) Kurose, R. and Komori, S., 1999, "Drag and Lift Forces on a Rotating Sphere in a Linear Shear Flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 384, pp. 183~206.
 - (50) Sakamoto, H. and Haniu, H., 1995, "The Formation Mechanism and Shedding Frequency of Vortices from a Sphere in Uniform Shear Flow", *J. Fluid. Mech.*, Vol. 287, pp. 151~171.
 - (51) Johnson, T. A. and Patel, V. C., 1999, "Flow Past a Sphere up to a Reynolds Number of 300", *J. Fluid Mech.*, Vol. 378, pp. 19~70.

- (52) Prasad, A. K. and Adrian, R. J., 1993, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry Applied to Liquid Flows, *Exp. Fluids*, Vol. 15, pp. 49~60.
- (53) Donaldson, C. D. and Snedeker, R. S., 1971, "A Study of Free Jet Impingement. Part 1. Mean Properties of Free and Impinging Jets", *J. Fluid Mech.*, Vol. 45, pp. 281~319.
- (54) Donaldson, C. D., Snedeker, R. S., and Margolis, D. P., 1971, "A Study of Free Jet Impingement. Part 2. Free Jet Turbulent Structure and Impingement Heat Transfer.", *J. Fluid Mech.*, Vol. 45, pp. 477~512.
- (55) Gardon, R. and Cobonpue, J., 1962, "Heat Transfer between a Flat Plate and Jets of Air Impinging on It", *Proc. 2nd, Heat transf. Conf.*, New York, U.S.A.
- (56) Gardon, R. and Cahit Akfirat J., 1965, "The Role of Turbulence in Determining the Heat-transfer Characteristics of Impinging Jets", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 1261~1272.
- (57) Striegl, S. A. and Diller, T. E., 1984, "The Effect of Entrainment Temperature on Jet Impingement Heat Transfer", *J. Heat Transf.*, Vol. 106, pp.27~33.
- (58) Goldstein, R. J., Sobolik, K. A. and Seol, W. S., 1990, "Effect of Entrainment on the Heat Transfer to a Heated Circular Air Jet Impinging on a Flat Surface", *Trans. ASME*, Vol. 112, pp. 608~

611.

- (59) Astarita, T., Cardone, G. and Meola, C., 2001, "Fluid Dynamics in an Impinging Air Jet", 4th Int. Sym. on PIV, Gottingen, Germany, September, 17-19, 2001.
- (60) Landreth, C. C. and Adrian, R. J., "Impingement of a Low Reynolds Number Turbulent Circular Jet onto a Flat Plate at Normal Incidence", *Exp. in Fluids*, Vol. 9, pp. 74~84.
- (61) Nishino, K., Samada, M., Kasuya, K., and Torii, K., 1996, "Turbulence Statistics in the Stagnation Region of an Axisymmetric Impinging Jet Flow.", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 17, pp. 193~201.
- (62) Nishino, K. and Takahashi, T., 2003, "High-Speed PIV Applied to a Submerged Circular Impinging Jet.", *Proc. of 5th Int. Sysm. on PIV*, Busan, Korea, September, 22-24.
- (63) Ellen, C. H. and Tu, C. V., 1984, "An Analysis of Jet Stripping of Liquid Coatings, *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 106, pp. 399~404.
- (64) Phares, D. J., Smedley, G. T. and Flagan, R. C., 2000, "The Wall Shear Stress Produced by the Normal Impingement of a Jet on a Flat Surface, *J. Fluid Mech.*, Vol. 418, pp. 351~375.
- (65) Cziesla, T., Biswas, G., Chattopadhyay, H. and Mitra, N. K., 2001, "Large-eddy Simulation of Flow and Heat Transfer in an Impinging Slot Jet, *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 22, pp. 500~

508.

- (66) 加藤信介, 2003, "室内空気質解析の最先端 - 数値流体力学に基づく室内空気質解析", *Proc. of JSAE Symposium*, No.02-03 車室内環境における空気質, pp. 47~55.
- (67) Tetsuo, H. and Shinsuke, K., 2004, "Numerical Simulation of Thermal Plumes in Free Space Using the Standard $k-\varepsilon$ Model, *Fire Safety Journal*, Vol. 39, pp. 105~129.
- (68) 문정현, 손장열, 2001, "기류실험을 위한 축소모형 실험에서의 축소 스케일 결정", 대한건축학회학술발표논문집, Vol. 21, No. 1, pp. 621~624.
- (69) 朱晟偉、林立也、加藤信介、村上周三, 2004, "可視化実験と数値解析による静穏室内の人体呼吸域流れ性状の検討", 日本建築學會計畫系論文集 No. 583, pp. 37~42.
- (70) Atwood, T. and Hughes, M., 1990, "Refrigerats and Energy Efficiency, *Int. J. Refrig.*, Vol. 13, July, pp. 270~273.
- (71) Janssen, M. J. P., Wit, J. A. and Kujipers, L. J. M., 1992, "Cycling Losses in Domestic Appliances: An Experimental and Theoretical Analysis, *Int. J. Refrig.*, Vol. 15, No. 3, pp. 152~158.
- (72) Tassou, S. A. and Qureshi, T. Q., 1998, "Comparative Performance Evaluation of Positive Displacement Compressors in Variable-speed Refrigeration Applications, Vol. 21, No.1, pp. 29~41.

- (73) 오민정, 이재현, 오명도, 1995, "냉장고 내부의 냉기 유동특성에 관한 3차원 해석", 공기조화 냉동공학논문집, 제7권 제3호, pp. 382~395.
- (74) 엄윤성, 부정숙, 윤인철, 2000, "냉장고의 냉기덕트 내부의 유동해석", 박용기관학회지, 제24권 제4호, pp. 117~122.
- (75) 이영환, 김상헌, 박일규, 이연원, 금종수, 김동규, 2001, "냉동실 결빙 메카니즘 정량화 및 착상량 최소화에 관한 연구", 한국동력기계학회 2001년도 춘계학술대회, pp. 64~70.
- (76) 도덕희, 최성환, 홍성대, 백태실, 이연원, 1998, "PIV에 의한 건축물 실내환기 특성 조사법", 공기조화냉동공학회 동계학술대회논문집(II), pp. 474~481.

< 참 고 자 료 >

PIV/PTV의 계측 불확실성 평가

PIV/PTV의 계측 불확실성 평가

1. 연구배경

PIV/PTV 기법은 상기 서술되어진 바와 같이 정량적인 속도계측기법 중의 하나로써 현재 기계, 조선, 항공, 및 건축 등 여러 분야에서 가장 폭넓게 사용되고 있다. PIV는 많은 연구자들에 의하여 다양한 종류의 PIV 알고리즘과 시스템이 구현되고 있으며, PIV 알고리즘 자체에서 발생하는 오차에 관한 연구도 수행되어지고 있다. Willert 등⁽¹⁾은 가상영상을 이용하여 입자의 변위, 밀도에 따른 RMS 오차를 제시하였으며, Okamoto 등(2000)⁽²⁾은 PIV 알고리즘 오차해석 및 검증을 위해 LES 결과를 이용하여 표준영상을 만들었으며, 이 영상을 일본가시화학회(JOV) 홈페이지에 수록하였다. 이리 하듯 PIV 시스템 개발과 관련하여서 연구자들이 각자의 평가방법을 도입하여 그들의 측정시스템에 대하여 평가를 하고 있는 실정에 있다. 따라서 PIV 시스템을 사용하고자 하는 연구자들은 어떠한 사전정보의 도움이 없는 상황에서 PIV 시스템을 적용하여 사용하고 있는 실정에 있다. 이는 PIV 시스템이 실용적으로 보편화되기 위해서는 이를 평가할 수 있는 표준안의 제시가 필요함을 의미한다⁽³⁾.

한편, PIV 시스템에 대한 국제표준화 작업은 이제 막 시작의 단계에 있으며, 독일의 PIVNET(<http://www.sm.go.dlr.de>), 프랑스의 PIVNET(<http://www.univ-lille1.fr/pivnet>), 일본의 JPIV(<http://www.vsj.or.jp/piv>)가

각국 별로 PIV표준화를 위한 활발한 활동을 하고 있다. 또한, PIV Challenge 워크숍은 이들 각국의 표준화 그룹들의 주도로 진행되고 있는 실정이다. 아울러 이들 나라 중 일본이 가장 활발한 활동을 하고 있으며, 한국도 PIV를 보편적으로 폭넓게 사용하는 국가의 하나로써 이에 동참할 필요가 있다.

이러한 세계적 추세와 함께 PIV/PTV 기반의 새로운 시스템을 구축하고자 선행 연구로써 표준영상을 이용하여 PIV 알고리즘에 의한 오차 평가 및 영상입력장치(카메라 및 이미지 그래버)에 대한 평가를 통하여 PIV 시스템의 계측불확실성(measurement uncertainty)에 대한 데이터베이스를 구축하였으며, 이를 통하여 실험대상 및 목적에 따른 최소한의 측정오차를 유지하면서 실험이 가능한 최적의 PIV 시스템 구성을 구성하고자 하였다. 또한 새로운 4D PTV 및 FSIMS 을 구축함에 있어서 PIV/PTV 시스템의 계측불확실성이 유용하게 사용되었다.

2. PIV시스템 평가 방법

Fig. 2.1은 PIV 시스템의 구성요소에 대한 계측의 불확실성(Uncertainty)을 정량적으로 추적하기 위한 개념도를 나타낸 것으로써 모든 PIV시스템의 평가는 이 개념도에 의하여 이루어졌다. 실제 PIV에 의한 실험측정 오차는 실험대상과 실험환경에 따라서 달라지므로 이러한 파라미터에 영향을 받지 않는 표준가상영상(Standard Virtual Image)을 이용하여 영상입력부(카메라), 영상기록부(이미지 그래버) 및 PIV알고리즘에 의한 계측오차를 추정하였다.

이 때, 표준가상영상의 구현은 회전체의 강제와(渦) 유동에 의하며, PIV시스템 구성요소에 대한 계통적 측정오차의 전파추정은 표준실험대상(회전원판)을 정하여 실제 실험을 통하여 실시하였다. 이 때, 실제 실험에서는 광원의 영향이 고려되어야 하므로 광학부를 추가하여 표준실험영상에 대한 평가를 수행하였다.

한편, 광학부에 의한 계측오차는 광원의 종류 및 특성(Beam Thickness, Beam Purity 등)에 의해 달라지는데 Tomimatsu 등⁽⁴⁾에 의하면 광원의 두께에 의한 오차는 최대 0.5pixel로 나타났다. 본 연구의 목적은 여러 가지의 실험대상 및 목적에 따른 최적의 PIV시스템을 구성하는데 있으며, 이를 위해서는 PIV시스템에 있어서 구성요소들에 의한 계측오차를 ASME의 불확실성(Measurement Uncertainty) 해석⁽⁵⁾에 의거하여 식 (2.1) 과 식 (2.2)를 사용하여 정량화하였다.

$$u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad \sigma = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - u)^2 \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

$$X = u \pm S_t \sigma \quad (2.2)$$

Fig. 2.2 (a)~(d)는 생성된 표준영상을 디지털 캠코더(SHARP, VL-PD3) 및 아날로그 비디오(SONY, SLV-RS1)로 영상을 저장시킨 후 다시 컴퓨터로 저장하기 위한 장치 A/D, D/A 양방향 변환기인 DAC 100을 나타낸 것으로써 실제 실험에 있어서는 카메라 영상을 컴퓨터에 저장하는 이미지 그래버(image grabber)에 해당하는 역할을 수행한다. 즉 표준영상을 아날로그

영상으로 바로 저장할 수 없으므로 DAC 100을 이용하여 저장하였다.

일반적으로 이미지 그래버는 카메라에서 들어오는 영상신호를 컴퓨터에 저장하는 역할을 수행하는 장치로써 많이 사용되고 있으나, 현재는 카메라에 내장되어 있는 메모리에 영상을 저장한 후 USB 포트를 이용하여 직접 컴퓨터로 저장하는 디지털 방식의 카메라가 사용되는 추세이나 고가의 장비이기 때문에 아직까지는 이미지 그래버가 주류를 이루고 있는 실정이다.

Fig. 2.1 과 같이 장치별 불확실성을 해석하기 위해서 표준 PIV 가상영상⁽²⁾이 필요하며, 식 (2.3)에 의해서 가상이미지를 생성한다. 이 때, 최대 강도 I_0 는 식 (2.4)에 의해서 구한다.

$$I(x,y) = I_0 \times \exp\left(-\frac{(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2}{(d_p/2)^2}\right) \quad (2.3)$$

$I(x,y)$: 입자(x_p, y_p)로부터의 Scattering에 의한 (x, y) 에서의 강도

(x_p, y_p) : 입자중심

d_p : 입자 크기

$$I_0 = I \times \exp\left(-\frac{z_p^2}{\sigma_l^2}\right) \quad (2.4)$$

I_0 : 레이저 두께를 구현하기 위한 영상의 최대 강도

I : 평균 영상 강도

z_p : 광원두께내에 존재하는 입자의 z위치

σ : 레이저의 두께

식 (2.3)과 (2.4)에 의해서 외경 118mm, 내경 41mm인 일반 CD에 임의의 회전량을 준 강제와(渦) 유동을 모사하였다. Fig. 2.3은 상기 제시된 방법으로 생성된 표준가상영상을 나타낸 것이다.

이러한 표준영상의 PIV 결과와 이들 장치에 의한 영상의 PIV 결과를 이용하여 전체 PIV 시스템에서의 불확실성을 해석하였다.

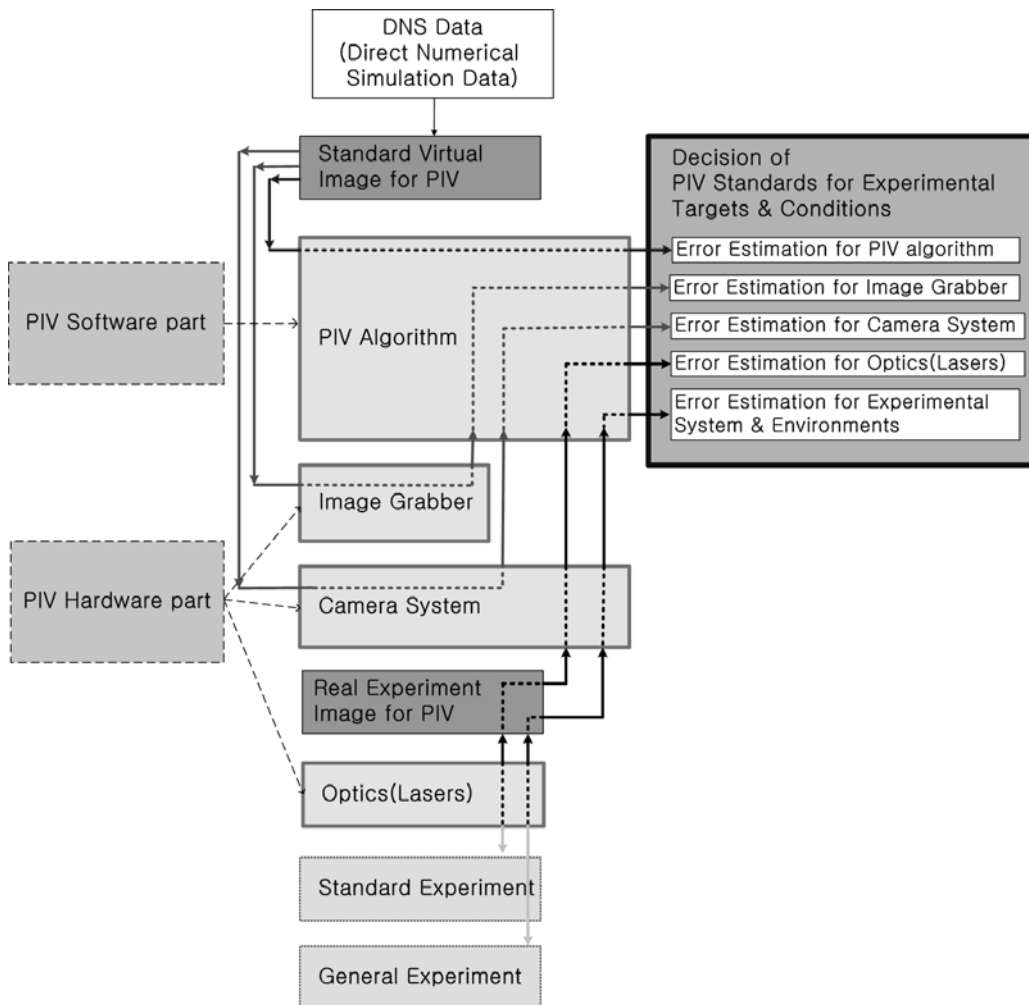


Fig. 2.1 Concept of a standardization for PIV system.



(a) DAC 100



(b) Digital camcorder



(c) Analog video

Fig. 2.2 Using system to convert standard image.

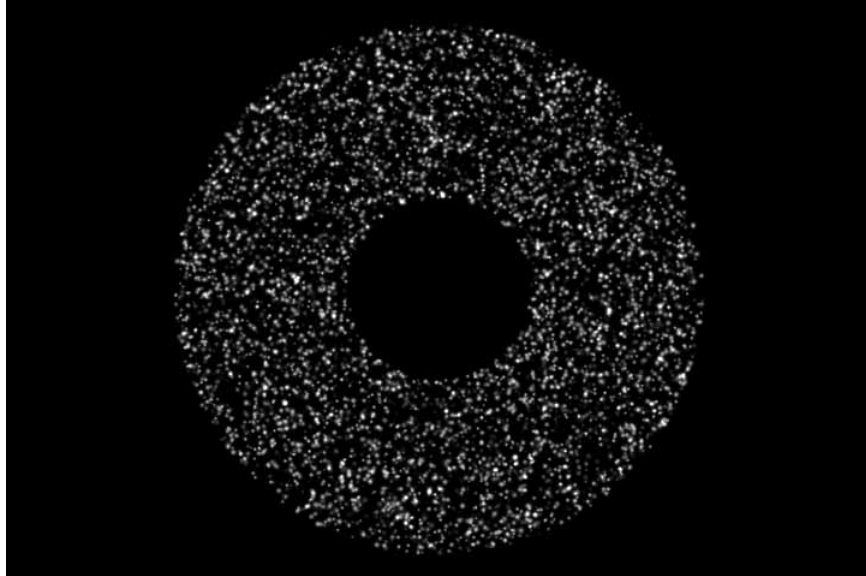


Fig. 2.3 Standard virtual image (720 × 480 pixel).

3. 입자영상유속계 시스템 구성요소별 계측오차 평가

3.1 계조치 상호상관 알고리즘 평가

계조치 상호상관 알고리즘을 평가하기 위해서 Fig. 2.3 과 같은 표준가상 영상을 위한 정보는 다음과 같다. 영상 크기 720*480 (Wid: Hei, Pixel), 디스크 대표길이 680 pixel, 입자수 12000개, 평균입자반경 1.2 pixel, 평균영상 강도 170, 레이저빔 두께 0.7pixel, 회전각은 1.0°, 1.5° 및 2.0° 로 하였으며, 생성된 표준가상영상을 이용하여 동일한 정지영상 두 장에 대하여 상호상관

알고리즘으로 상관계수를 계산함으로써 알고리즘 자체에 대한 오차를 평가하였다. 이 때, PIV 알고리즘을 적용하기 위하여 이동거리를 8Pixel로 하여 이 범위 내에서 상관값을 구하도록 하였으며, 입자의 개수(밀도), 입자의 직경크기 및 계산을 위한 상관영역의 크기에 따른 계측오차를 평가하였다.

Table 3.1은 계측결과로써 동일한 입자개수, 입자크기의 상황에서는 상관영역이 커질수록 계측오차의 불확실성이 적어짐을 확인하였다. 이는 정지한 유동상황 혹은 느린 유동상황일 때는 상관영역을 크게 할수록 계측오차의 불확실성이 적어짐을 의미한다. 동일한 입자의 크기일 때 입자수가 증가할수록 계측오차의 불확실성이 다소 감소함을 알 수 있다. 즉, 알고리즘에 의한 오차영향을 줄이기 위해서는 동일한 크기의 입자의 개수를 상대적으로 증가시키는 것이 좋으며, 입자직경에 의한 오차영향은 적은 것으로 나타났다.

Table 3.1 Result of cross correlation algorithm.

Particle Num.	Particle Diameter	Rotation Angle	Correlation Domain Size (N x N) pixel	Averaged Error (pixel)	Standard Deviation (pixel)
10000	0.5~1.0 Pixel	1.0°	17	0.00424	0.05239
			33	0.00180	0.01566
			65	0.00067	0.00551
		2.0°	17	0.00494	0.05100
			33	0.00181	0.01582
			65	0.00084	0.00543
	1.0~1.5 Pixel	1.0°	17	0.00448	0.04351
			33	0.00181	0.01439
			65	0.00081	0.00470
		2.0°	17	0.00378	0.04740
			33	0.00181	0.01408
			65	0.00070	0.00487
15000	0.5~1.0 Pixel	1.0°	17	0.00384	0.03539
			33	0.00189	0.01189
			65	0.00071	0.00424
		2.0°	17	0.00352	0.03936
			33	0.00156	0.01287
			65	0.00094	0.00451
	1.0~1.5 Pixel	1.0°	17	0.00384	0.03539
			33	0.00189	0.01189
			65	0.00071	0.00424
		2.0°	17	0.00394	0.03555
			33	0.00184	0.01195
			65	0.00084	0.00419
20000	0.5~1.0 Pixel	1.0°	17	0.00379	0.03416
			33	0.00194	0.01104
			65	0.00106	0.00390
		2.0°	17	0.00416	0.03387
			33	0.00129	0.01158
			65	0.00084	0.00403
	1.0~1.5 Pixel	1.0°	17	0.00356	0.03185
			33	0.00171	0.01081
			65	0.00097	0.00369
		2.0°	17	0.00347	0.03142
			33	0.00161	0.01075
			65	0.00101	0.00363

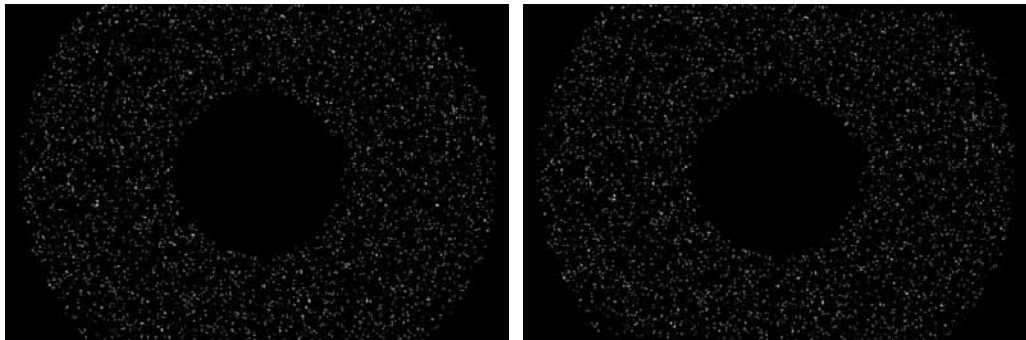
3.2 영상입력부(카메라) 평가

Fig. 3.1은 회전각 2.0° 일 때의 회전원판의 가상 영상을 나타낸 것이며, 이 영상을 이용하여 카메라에 의한 계측 불확실성 영향을 분석하고자 하였다. 총 120장의 에 대한 통계처리를 통하여 분석하였다.

Fig. 3.2는 Fig. 3.1의 영상을 디지털 카메라와 아날로그 카메라를 거쳐서 획득된 영상으로 회전원판의 임의 끝단을 확대한 영상으로 디지털 카메라를 통한 영상을 나타내는 (b)는 거의 동일하게 복원되었으며, 아날로그 카메라(DAC 변환기의 D/A변환을 한 결과)를 통한 영상은 (c)와 같이 잡음과 함께 영상이 이동(shifting)된 것처럼 나타났다. 이는 아날로그 카메라를 PIV시스템의 구성요소로 사용할 경우 A/D변환에 따른 영상의 jittering에 의한 계측오차가 발생됨을 의미한다. 각각의 영상간의 히스토그램분포를 살펴봤을 때에도, (a)와 (b)는 비슷하였으나, (c)는 달라졌다. 이와 같은 현상에 대한 평가를 위하여 계조치상호상관법[7]을 사용하였으며, 앞서 기술된 바와 같이, Fig. 3.3와 같이 아날로그 영상의 경우 영상신호의 jittering에 의한 영상의 변위가 발생하였다.

Table 3.2은 이들 변위량 계산결과를 나타낸다. 디지털 영상에 의한 계측 오차는 거의 무시할 수준이었으며 아날로그 영상에 의한 계측오차는 2.4 pixel(화소) 이동됨을 알 수 있다. 이 이동량은 유동장의 영상에 대하여 일정방향으로 이동되는 량이므로 보정함으로써 오차를 없앨 수 있거나 아니면 디지털카메라를 사용함으로써 계측오차를 없앨 수 있음을 의미한다. 실제로 두 장 연속의 영상을 아날로그영상으로 변환하여 계산하여 본 결과 영상이

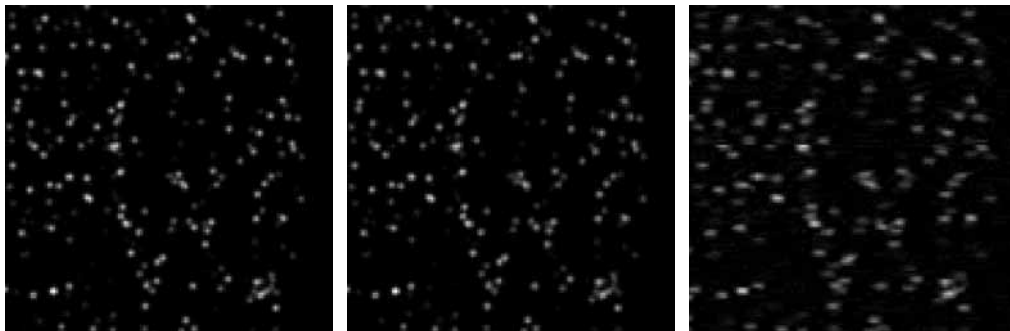
동에 의한 영향은 적었다.



(a) Before rotation angle

(b) After rotation ($d\theta = 2.0^\circ$ / frame)

Fig. 3.1 Standard virtual image of the rotating disk(720 x 480 pixels).

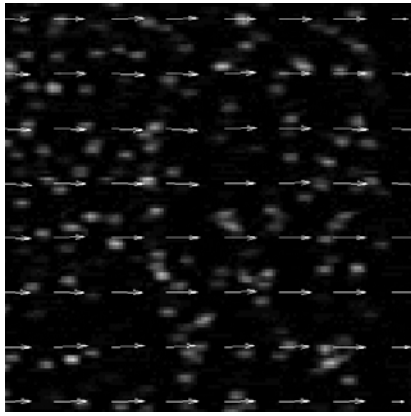


(a) Original Image

(b) Digital Cam Image

(c) Analog Image

Fig. 3.2 Image grabbing result with image grabber ($d\theta = 2.0^\circ$).



(a) Displacement with AV image



(b) Displacement

Fig. 3.3 Shifts of the Analog video image from the original image.

Table 3.2 Result of digital image and analog image [unit: pixel].

	Rotation 1.0°		Rotation 1.5°		Rotation 2.0°		SUM	
	Mean	Standard	Mean	Standard	Mean	Standard	Mean	Standard
	Error	Deviation	Error	Deviation	Error	Deviation	Error	Deviation
Digital Video	0.00048	0.00491	0.00064	0.00541	0.00056	0.00507	0.00056	0.00513
Analog Video	2.35611	0.13553	2.37624	0.13641	2.37971	0.14075	2.37069	0.13756

3.3 영상입력부(영상그래버)에 의한 평가

영상입력부를 평가하기 위해서 Fig. 3.4와 같은 표준가상영상을 위한 정보는 다음과 같다. 영상 크기 720*480 (Wid: Hei, Pixel), 디스크 대표길이 440 pixel, 입자수 12000, 15000, 20000개, 평균입자반경 0.5(1.0), 1.0(1.5) pixel, 평균영상장도 170, 레이저빔 두께 0.7pixel, 회전각은 1.0°와 2.0°로 하였으며, Fig. 3.5는 이 표준가상영상을 512 × 480의 8bit 이미지 그래버로 획득한 영상이다. 이 결과 표준가상영상 해상도와 이미지 그래버 해상도 간의 장방비가 불일치한 관계로, 세로 해상도는 480으로 동일하여 세로방향의 영상형상에는 변화가 없었으나, 가로방향의 경우 0.895배로 줄어들어 영상이 가로방향으로 다소 일그러져있음을 확인하였다. 이는 두 매체간의 해상도의 문제이므로 실제 이미지 그래버로 영상을 저장하였을 때 영상이 일그러지는 현상은 아니며, 다만 표준가상영상과 영상입력부에 대한 평가를 위해서 일그러진 영상부에 대한 PIV의 결과의 보정이 필요하였으며, 보정은 행상도 손실에 대한 계수 0.895의 역수인 1.117을 사용하였다.

최근에는 카메라에 내장된 메모리에서 USB포트를 통해 컴퓨터로 영상을 바로 전송시키므로 이 경우에는 본 평가에 해당되지 않는다.

한편 사용된 8bit 이미지 그래버는 인터레이스(interlace) 저장방식인 관계로 하나의 프레임(frame)영상에 대하여 1/60초 시간차를 가지는 두 장의 필드영상(field image)으로 저장된다. 따라서 Fig. 3.5와 같이 입자유동의 궤적 형태를 보이고 있으며, 속도벡터장을 계산하기 위하여 Fig. 3.6의 (a)와 (b)와 같이 필드영상으로 분리하였고, 이 두 영상을 상호상관알고리즘을 사

용하여 속도를 구하였다.

Table 3.3는 Table 3.2의 조건하에서 얻어진 회전원판의 표준가상영상을 이미지 그래버로 획득한 다음 이 영상에 대하여 상호상관알고리즘으로 계산한 속도장의 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 3.7는 원판의 한 지점($X=-161$ pixel)에서의 Y축 상의 이론상 이동량에 대한 식 (3.1)에 의해 상대오차를 나타낸 것으로 그림상의 번호는 Table 3.2의 조건번호와 일치하며, 이 때의 조건은 왼쪽에서 순차적으로 입자수, 입자직경크기, 회전각도의 순이다. 그림에서 빨간색으로 표시된 점들은 각 조건에서 작성한 표준가상영상에 대하여 상관알고리즘으로 계산한 결과와 파란색으로 표시된 점들은 이미지 그래버를 통과한 후의 영상을 상호상관알고리즘으로 계산한 결과를 나타낸다.

조건번호 1에서 6에 해당하는 입자수 10000개, 입자크기 1.0 이하 일 때는 회전각도와 상관영역크기와 관계없이 표준가상영상과 이미지 그래버를 통과한 영상 모두 이론속도와의 상대오차가 큼을 알 수 있다. 이는 동일한 입자수일 경우 입자크기가 너무 작은 경우는 오차가 상대적으로 커짐을 알 수 있다. 한편 이는 유동장의 이동이 없을 때에 동일입자수일 경우 입자직경이 작은 경우가 오차가 상대적으로 작아지는 경우와 배치되는 결과임에 유의해야 한다. 유동장의 운동이 많을 경우에는 적절한 입자크기가 요구됨을 의미한다.

조건번호 7이후에는 이미지 그래버를 통과한 후의 영상으로 계산하였을 때 (실제 PIV 계측인 상황에 해당됨) 입자수와 입자크기가 동일한 조건에서는 상관영역의 크기가 클수록 상대오차가 작아짐을 알 수 있으며, 회전각도

의 변화에 따른 상대오차의 절대 크기값이 일정함을 확인할 수 있었다. 즉 이동량의 변화가 커지더라도 상관영역의 크기가 충분하게 클 경우 PIV에 의한 계측이 이론속도에 대해 약 2%정도의 상대오차를 갖는 공학적으로 아주 높은 정확도(Accurate)와 정밀도(Precise)를 유지함을 확인하였다.

$$Relative\ Error\ [\%] = \frac{V - V_{ref}}{V_{ref}} \times 100 \quad (3.1)$$

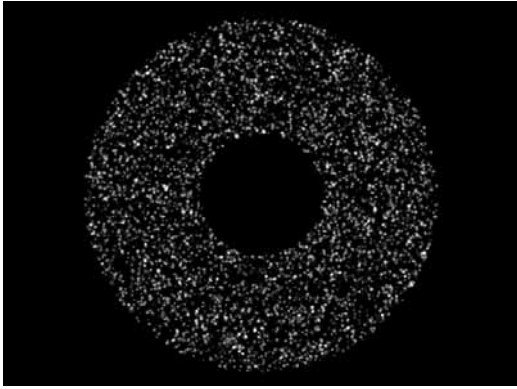


Fig. 3.4 Standard virtual image
(720×480).

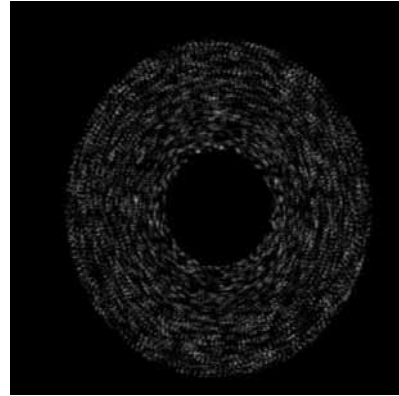
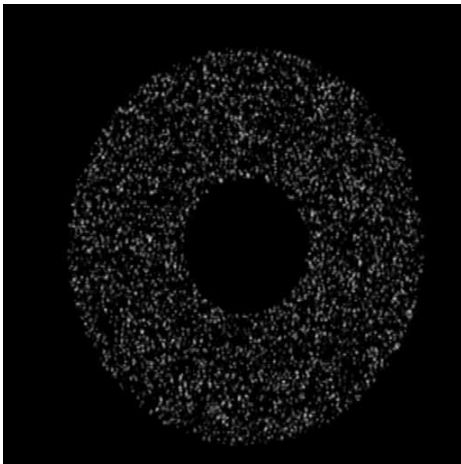
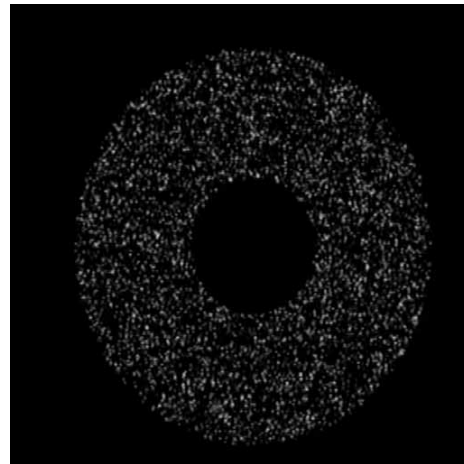


Fig. 3.5 Grabbing image for
Image grabber (512×480).



(a) Odd field image



(b) Even field image

Fig. 3.6 Field image of grabbing image.

Table 3.2 Measurement conditions.

Condition Num, Particle Num. Particle Diameter(pixel), Rotation Angle(°), Correlation Domain Size(pixel x pixel)					
1	10000, ~1.0, 1.0, 17	13	15000, ~1.0, 1.0, 17	25	20000, ~1.0, 1.0, 17
2	10000, ~1.0, 1.0, 33	14	15000, ~1.0, 1.0, 33	26	20000, ~1.0, 1.0, 33
3	10000, ~1.0, 1.0, 65	15	15000, ~1.0, 1.0, 65	27	20000, ~1.0, 1.0, 65
4	10000, ~1.0, 2.0, 17	16	15000, ~1.0, 2.0, 17	28	20000, ~1.0, 2.0, 17
5	10000, ~1.0, 2.0, 33	17	15000, ~1.0, 2.0, 33	29	20000, ~1.0, 2.0, 33
6	10000, ~1.0, 2.0, 65	18	15000, ~1.0, 2.0, 65	30	20000, ~1.0, 2.0, 65
7	10000, ~1.5, 1.0, 17	19	15000, ~1.5, 1.0, 17	31	20000, ~1.5, 1.0, 17
8	10000, ~1.5, 1.0, 33	20	15000, ~1.5, 1.0, 33	32	20000, ~1.5, 1.0, 33
9	10000, ~1.5, 1.0, 65	21	15000, ~1.5, 1.0, 65	33	20000, ~1.5, 1.0, 65
10	10000, ~1.5, 2.0, 17	22	15000, ~1.5, 2.0, 17	34	20000, ~1.5, 2.0, 17
11	10000, ~1.5, 2.0, 33	23	15000, ~1.5, 2.0, 33	35	20000, ~1.5, 2.0, 33
12	10000, ~1.5, 2.0, 65	24	15000, ~1.5, 2.0, 65	36	20000, ~1.5, 2.0, 65

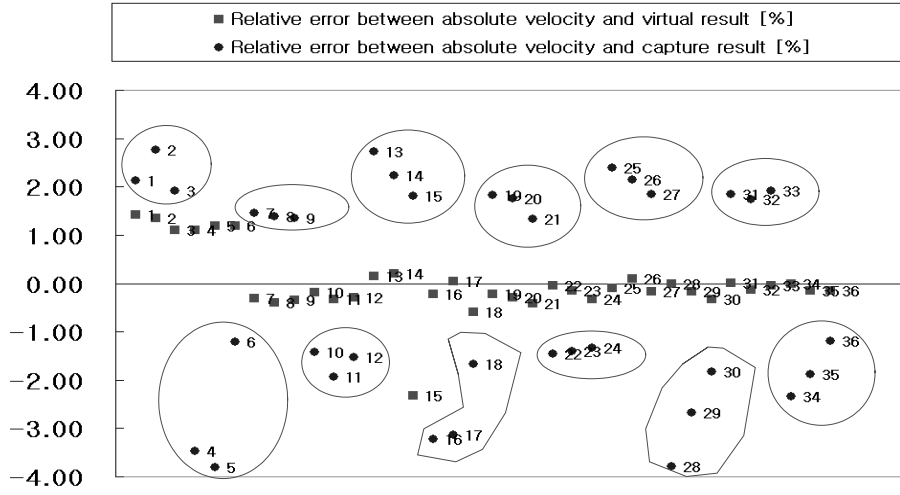


Fig. 3.7 Relative error for standard virtual image and captured image.

Table 3.3 Result of cross correlation algorithm for each images.

입자수	입자 크기	회전 각도	상관 영역 크기	이론 이동량		회전	1.0	3.13927p	그래버통과 전의 상대오차 [%]	그래버통과 후의 상대오차 [%]	
						각도	2.0	6.27855p			
				영상그래버 통과전		영상그래버 통과후					
				평균오차	표준편차	평균오차	표준편차				
10000	0.5 ~	1.0	17	3.09460	0.36900	3.07230	0.07290	1.42294	2.13330		
			33	3.09660	0.36490	3.05260	0.03910	1.35923	2.76083		
			65	3.10470	0.36810	3.07900	0.05740	1.10121	1.91987		
	1.0	2.0	17	6.20960	0.53430	6.49620	0.23700	1.09818	-3.46656		
			33	6.20350	0.52990	6.51780	0.15960	1.19534	-3.81059		
			65	6.20360	0.53480	6.35430	0.25310	1.19375	-1.20649		
	1.0 ~	1.0	17	3.14870	0.05440	3.09380	0.05840	-0.30039	1.44843		
			33	3.15150	0.04630	3.09570	0.05280	-0.38958	1.38790		
			65	3.15010	0.05600	3.09690	0.04910	-0.34498	1.34968		
	1.5	2.0	17	6.28990	0.09980	6.36810	0.21280	-0.18077	-1.42628		
			33	6.29940	0.10600	6.40010	0.16200	-0.33208	-1.93596		
			65	6.29690	0.11570	6.37430	0.13160	-0.29226	-1.52503		
15000	0.5 ~	1.0	17	3.13480	0.05220	3.05350	0.04620	0.14239	2.73216		
			33	3.13290	0.04640	3.06900	0.04170	0.20291	2.23842		
			65	3.21220	0.90420	3.08240	0.03010	-2.32315	1.81157		
	1.0	2.0	17	6.29270	0.08830	6.48100	0.22180	-0.22537	-3.22447		
			33	6.27540	0.09000	6.47590	0.18450	0.05017	-3.14324		
			65	6.31570	0.13800	6.38300	0.17210	-0.59170	-1.66360		
	1.0 ~	1.0	17	3.14620	0.05470	3.08210	0.05530	-0.22075	1.82112		
			33	3.14840	0.04190	3.08390	0.04370	-0.29083	1.76379		
			65	3.15230	0.03830	3.09730	0.03140	-0.41506	1.33694		
	1.5	2.0	17	6.28170	0.08060	6.37010	0.18350	-0.05017	-1.45814		
			33	6.28790	0.08100	6.36640	0.15620	-0.14892	-1.39921		
			65	6.29920	0.08770	6.36220	0.11910	-0.32890	-1.33231		
20000	0.5 ~	1.0	17	3.14220	0.04800	3.06440	0.04730	-0.09333	2.38495		
			33	3.13600	0.03640	3.07210	0.03840	0.10416	2.13967		
			65	3.14430	0.03940	3.08130	0.03530	-0.16023	1.84661		
	1.0	2.0	17	6.27860	0.08100	6.51670	0.19860	-0.00080	-3.79307		
			33	6.28960	0.07540	6.44630	0.13100	-0.17600	-2.67180		
			65	6.29950	0.09210	6.39280	0.13910	-0.33368	-1.81969		
	1.0 ~	1.0	17	3.13880	0.04510	3.08110	0.03050	0.01497	1.85298		
			33	3.14360	0.03580	3.08470	0.03930	-0.13793	1.73830		
			65	3.14060	0.03250	3.07890	0.03220	-0.04237	1.92306		
	1.5	2.0	17	6.27890	0.07750	6.42600	0.12830	-0.00557	-2.34847		
			33	6.28780	0.07830	6.39700	0.13610	-0.14733	-1.88658		
			65	6.28840	0.08610	6.35290	0.13210	-0.15688	-1.18419		

3.4 광원 영향 평가

광원에 의한 측정시스템의 계측오차 영향을 평가하기 위하여 회전원판 상에 추적입자(Hallow glass, 직경=200 μm)를 도포한 다음 이에 대하여 광원(레이저, 120mJ Nd-Yag)으로 조사된 유동장에 대하여 실제 실험을 하였다.

Fig. 3.8은 실험장치의 개요를 나타낸 것으로 사용된 원판은 직경 120mm의 표준 CD이며, 레이저 광원에 의한 난반사가 발생하지 않도록 무광흑색도료로 도포하였고, 이 표면위에 Fig. 3.9와 같이 추적입자를 입혔다.

Fig. 3.10은 디스크를 구동하기 위한 전동기와 케이싱을 나타낸 것으로 Fig. 3.11와 같은 서버모터(LG-OTIS, LF03)를 사용하였으며 회전 속도조정을 위하여 드라이브(LG-OTIS, 6004)를 사용하였다. 광원(Nd-Yag 레이저)과 카메라(1k x 1k)는 동기장치(LC880)로 동기시켰으며, 이를 이용하여 두 시각차의 영상을 얻었다. 이 때 시간차는 회전원판 최외각의 이동량이 5~10Pixel 이내가 되도록 조절하였으며, 상호상관계산을 위한 탐색거리는 8 pixel로 하였다. Table 3.4은 실험을 위한 조건으로 회전수 100, 200, 300 rpm, 광원(레이저) 출력 17, 22, 26 mJ 과 상관영역크기 17, 33, 65 pixel 로 세분화하였다.

Fig. 3.12는 Table 3.4에 의해서 실험을 수행한 후 실제 회전디스크의 속도와 원판의 한 지점(X=-205 pixel)에서의 Y축상의 회전원판 속도간의 상대오차를 그래프로 나타낸 것이며, Table 3.5는 실험조건별 결과치들을 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 동일한 회전수에 대해서는 광원의 출력과

상관영역의 크기의 영향이 절대적이지 않음을 확인할 수 있었으며, 반면에 표준영상에서의 결과와 달리 회전수에 의한 상대오차가 경우에 따라 최대 10% 이상 발생하는 것이 있었다. 이는 1픽셀 이하의 서브픽셀 단위의 오차임을 확인되어졌다.

Fig. 3.13은 광원출력을 각각 17mJ, 22mJ, 26mJ로 변화시켰을 때 회전원판의 영상 및 밝기에 대한 히스토그램분포를 나타낸다. 분포는 거의 유사하며, 다만 레이저 파워가 증가함에 따라 평균밝기가 증가함을 알 수 있다.

평균밝기 변화가 상호상관계측 결과에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다는데 이는 실제 계산결과 Fig. 3.12에서 동일 조건하에서의 밝기변화에 따른 상대오차가 작음으로부터 확인되어졌다. 따라서 이상적인 광원의 조건은 유동장에 대하여 육안으로 보아 입자가 잘 관찰되는 광원의 출력근처에서 조절하기만 하면 됨을 의미한다. 즉 미세한 광원출력의 조정으로 인한 실험 조건의 향상은 기대하지 않는 것이 좋다.



Fig. 3.8 Experiment system
for light source effect.

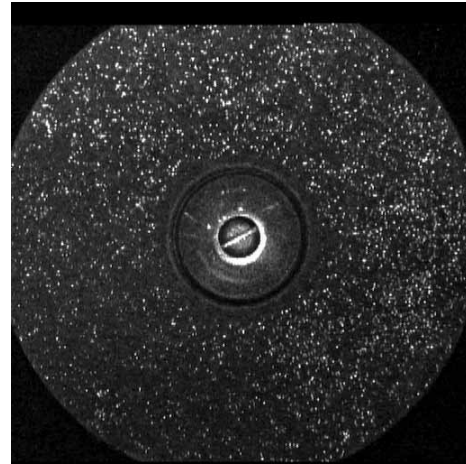


Fig. 3.9 Coated hallow glass on
on disk.



Fig. 3.10 Motor casing for driving disk.



Fig. 3.11 Driving motor and
driver.

Table 3.4 Measurement conditions.

Condition Num,	Num of Revolution[rpm],	Laser power[mJ],	Correlation
Domain Size [pixel x pixel]			
1	100, 17, 17	10	200, 17, 17
2	100, 17, 33	11	200, 17, 33
3	100, 17, 65	12	200, 17, 65
4	100, 22, 17	13	200, 22, 17
5	100, 22, 33	14	200, 22, 33
6	100, 22, 65	15	200, 22, 65
7	100, 26, 17	16	200, 26, 17
8	100, 26, 33	17	200, 26, 33
9	100, 26, 65	18	200, 26, 65
		19	300, 17, 17
		20	300, 17, 33
		21	300, 17, 65
		22	300, 22, 17
		23	300, 22, 33
		24	300, 22, 65
		25	300, 26, 17
		26	300, 26, 33
		27	300, 26, 65

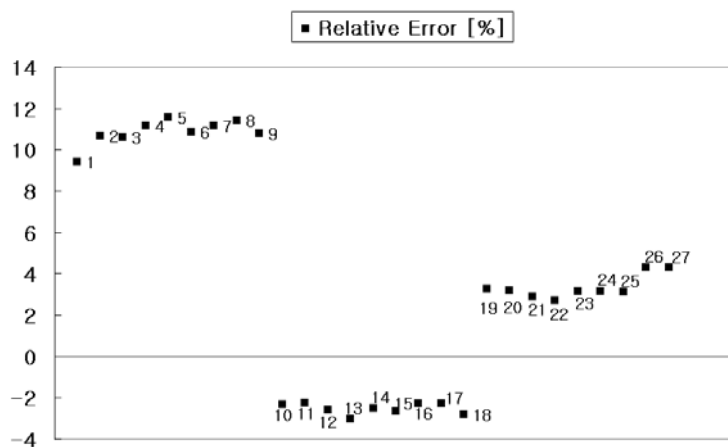
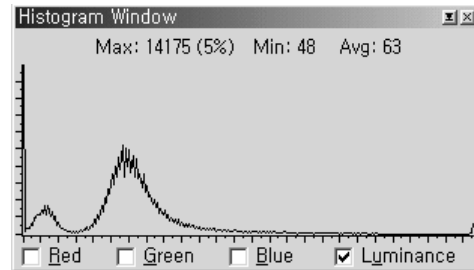
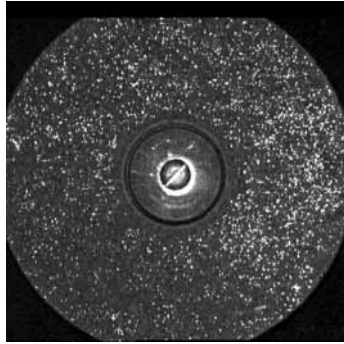


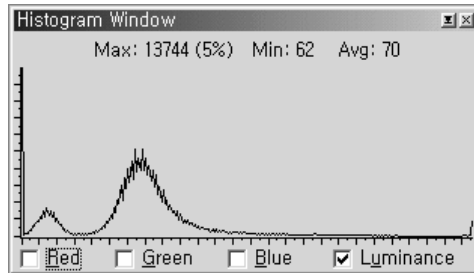
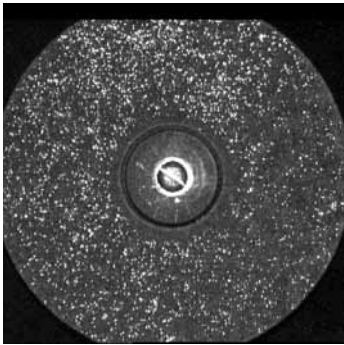
Fig. 3.12 Relative error for rotating disk.

Table 3.5 Result of cross correlation algorithm for rotating disk.

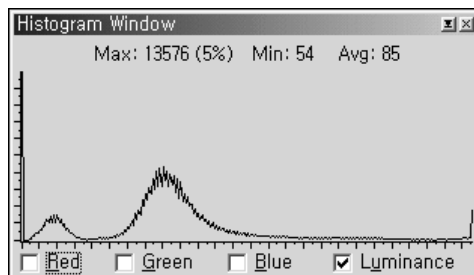
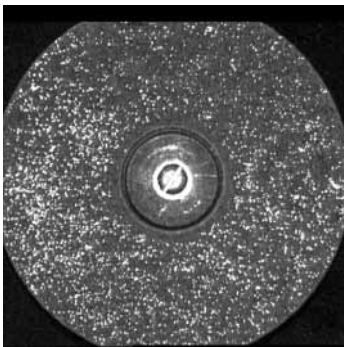
회전수 [rpm]	이론 이동량 [pixel]	레이저 출력 [mJ]	상관 영역 크기 [Pixel]	평균오차 [pixel]	표준편차 [pixel]	상대오차 [%]
시간 간격 [μsec]						
100			17	3.30610	0.20850	9.40901
			33	3.25960	0.09040	10.68317
	3.64948	17	65	3.26200	0.06200	10.61740
			17	3.24200	0.14910	11.16543
			33	3.22670	0.08810	11.58466
		22	65	3.25340	0.04620	10.85305
1700			17	3.24240	0.13720	11.15447
		26	33	3.23230	0.05500	11.43122
			65	3.25530	0.04670	10.80099
200	4.72286	17	17	4.83280	0.19340	-2.32783
			33	4.82850	0.04890	-2.23678
			65	4.84430	0.06500	-2.57132
		22	17	4.86590	0.10960	-3.02867
			33	4.84060	0.05230	-2.49298
			65	4.84910	0.05740	-2.67296
		26	17	4.83010	0.15540	-2.27066
			33	4.83010	0.08000	-2.27066
			65	4.85500	0.05830	-2.79788
300	3.22013	17	17	3.11500	0.10320	3.26478
			33	3.11770	0.04680	3.18093
			65	3.12710	0.04330	2.88901
		22	17	3.13320	0.09710	2.69958
			33	3.11880	0.06360	3.14677
			65	3.11880	0.06360	3.14677
		26	17	3.11920	0.06740	3.13435
			33	3.08160	0.32070	4.30200
500			65	3.08160	0.32070	4.30200



(a) 100RPM, 17mJ



(b) 100RPM, 22mJ



(c) 100RPM, 26mJ

Fig. 3.13 Difference of brightness and histogram distribution on the rotating disk by light source.

4. 입자영상유속계 시스템에 대한 계측불확실성 해석

계측시스템의 불확실성을 평가하기 위해서 아래와 같은 식 (4.1)~(4.6)을 사용하였으며, 평가기준은 ASME⁽⁵⁾에 준하였다.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} , \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (4.1)$$

$$\nu_1 = \frac{(\sum_i S_{i1}^2)^2}{\sum_i \frac{S_{i1}^4}{\nu_{i1}}} , \quad \nu = \nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \dots \quad (4.2)$$

$$S = \sqrt{\sum_j \sum_i S_{ij}^2} \quad (4.3)$$

$$B = \sqrt{\sum_j \sum_i B_{ij}^2} \quad (4.4)$$

$$U_{ADD} = U_{99} = \pm (B + t_{95} \cdot S) \quad (4.5)$$

$$U_{RSS} = U_{95} = \pm \sqrt{B^2 + (t_{95} \cdot S)^2}$$

$$u = \bar{X} \pm U_{ADD} , \quad u = \bar{X} \pm U_{RSS} \quad (4.6)$$

\bar{X} : 평균

ν : 시스템 전체 자유도

S : 우연오차

B : 고정오차

U, u : 계측의 불확실성

1) 상호상관알고리즘의 계측불확실성 분석 결과(PIV)

$$B_{PIV}=0.0022, S_{PIV}=0.0188, v_{PIV}=1872$$

2) 영상입력장치(카메라)에 따른 계측불확실성 분석 결과

① 디지털카메라를 적용할 시 (DA)

$$B_{DA}=0.0006, S_{DA}=0.0051, v_{DA}=120$$

② 아날로그카메라를 적용할 시 (AD)

$$B_{AD}=2.3707, S_{AD}=0.1376, v_{AD}=120$$

이 값은 고정적으로 발생하며 알 수 있는 량 일뿐만 아니라 두 장 연속된 영상에 동일하게 영상의 이동량이 발생하므로 속도장을 계측하는데에는 계측의 고정오차 영향은 무시하고 우연오차만을 고려한다. 특히 디지털카메라를 최근 사용하는 추세인데 디지털카메라를 사용할 경우 영상입력장치에 대한 불확실성을 거의 고려되지 않아도 무방하다.

3) 영상 그래버에 대한 계측불확실성 분석 결과

$$B_{CI+}= 0.0603, S_{CI}=0.0445, v_{CI}=1080$$

$$B_{CI-}= -0.1371, S_{CI}=0.1699, v_{CI}=1080$$

4) 실제 표준실험을 통한 광원의 영향에 의한 계측불확실성 분석 결과

$$B_{EXP+} = 0.2519, S_{EXP} = 0.1116, v_{EXP} = 2592$$

$$B_{EXP-} = -0.1190, S_{EXP} = 0.0911, v_{EXP} = 2592$$

$$\begin{aligned} U_{ADD}^+ = U_{99} &= \pm (B_{EXP}^+ + t_{95} \cdot S_{EXP}) \\ &= \pm (0.2519 + 1.96 \cdot 0.1116) = \pm 0.4707 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{ADD}^- = U_{99} &= \pm (B_{EXP}^- + t_{95} \cdot S_{EXP}) \\ &= \pm (-0.1190 + 1.96 \cdot 0.0911) = \pm 0.0597 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{RSS}^+ = U_{95} &= \pm \sqrt{B_{EXP}^{+2} + (t_{95} \cdot S_{EXP})^2} \\ &= \pm \sqrt{0.2519^2 + (1.96 \cdot 0.1116)^2} = \pm 0.3336 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{RSS}^- = U_{95} &= \pm \sqrt{B_{EXP}^{-2} + (t_{95} \cdot S_{EXP})^2} \\ &= \pm \sqrt{(-0.1190)^2 + (1.96 \cdot 0.0911)^2} = \pm 0.2146 \end{aligned}$$

광원의 영향을 평가하기 위하여 실제 실험을 수행하였으므로 광원에 의한 계측오차의 불확실성에는 카메라 및 영상그래버의 영향도 포함된다. 광원의 조정에 의한 영향을 평가하기 위해서 실제 실험에 대한 오차평가 결과 계측의 불확실성이 위에 제시된 값과 같았다. 이 값은 다른 구성요소들에 비하여 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다.

한편 광원에 의한 계측오차는 광원의 종류 및 특성 (beam thickness, beam purity 등)에 의해 달라지는데 Tomimatsu 등⁽⁴⁾에 의하면 광원의 두께에 의한 속도벡터 계측오차의 불확실성을 표준가상영상만으로 평가한 결과가 최대 0.5pixel로 됨을 밝혔는데, 실험을 통해 구해진 값보다 Tomimatsu 등의 결과치가 더 크다는 것을 확인하였으며, 이는 본 연구에서 수행한 실제 실험결과에 의한 광원의 영향을 최대 0.5로 간주하여도 됨을 의미하므로 광원에 의한 영향을 0.5pixel로 하였다.

$$B_L = 0.5, S_L = 0, v_L = 300$$

5) 전체 PIV 시스템에서의 불확실성: (1)에서 (4)항까지 모두를 고려함

$$B_{SYS+} = 0.5046, S_{SYS} = 0.0486, v_{SYS} = 1504$$

$$B_{SYS-} = 0.5185, S_{SYS} = 0.1710, v_{SYS} = 1108$$

$$\begin{aligned} v_{SYS} &= \frac{(S_{PIV}^2 + S_{DA}^2 + S_{CI}^2 + S_L^2)^2}{\frac{S_{PIV}^4}{\nu_{PIV}} + \frac{S_{DA}^4}{\nu_{DA}} + \frac{S_{CI}^4}{\nu_{CI}} + \frac{S_L^4}{\nu_L}} \\ (+) &= \frac{(0.0188^2 + 0.0051^2 + 0.0445^2 + 0^2)^2}{\frac{0.0188^4}{1872} + \frac{0.0051^4}{120} + \frac{0.0445^4}{1080} + \frac{0^4}{300}} \\ &\doteq 1504 \\ (-) &= \frac{(0.0188^2 + 0.0051^2 + 0.1699^2 + 0^2)^2}{\frac{0.0188^4}{1872} + \frac{0.0051^4}{120} + \frac{0.1699^4}{1080} + \frac{0^4}{300}} \\ &\doteq 1108 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{SYS}^+ &= \sqrt{(B_{PIV})^2 + (B_{DA})^2 + (B_{CI}^+)^2 + (B_L)^2} \\ &= \sqrt{(0.0022)^2 + (0.0006)^2 + (0.0603)^2 + (0.5000)^2} \\ &= 0.5036 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{SYS}^- &= \sqrt{(B_{PIV})^2 + (B_{DA})^2 + (B_{CI}^-)^2 + (B_L)^2} \\ &= \sqrt{(0.0022)^2 + (0.0006)^2 + (-0.1371)^2 + (0.5000)^2} \\ &= 0.5185 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{SYS} &= \sqrt{(S_{PIV})^2 + (S_{DA})^2 + (S_{CI})^2 + (S_L)^2} \\
(+) &= \sqrt{(0.0188)^2 + (0.0051)^2 + (0.0445)^2 + (0)^2} \\
&= 0.0486 \\
(-) &= \sqrt{(0.0188)^2 + (0.0051)^2 + (0.1699)^2 + (0)^2} \\
&= 0.1710
\end{aligned}$$

자유도가 모두 31이상이므로 $t_{95} = 1.96$ 을 사용하며, 이 때의 계측의 불확실성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
U_{ADD}^+ &= U_{99} = \pm (B_{SYS}^+ + t_{95} \cdot S_{SYS}) \\
&= \pm (0.5036 + 1.96 \cdot 0.0490) = \pm 0.5989 \\
U_{ADD}^- &= U_{99} = \pm (B_{SYS}^- + t_{95} \cdot S_{SYS}) \\
&= \pm (0.5185 + 1.96 \cdot 0.1710) = \pm 0.8537 \\
U_{RSS}^+ &= U_{95} = \pm \sqrt{B_{SYS}^{+2} + (t_{95} \cdot S_{SYS})^2} \\
&= \pm \sqrt{0.5036^2 + (1.96 \cdot 0.0486)^2} = \pm 0.5126 \\
U_{RSS}^- &= U_{95} = \pm \sqrt{B_{SYS}^{-2} + (t_{95} \cdot S_{SYS})^2} \\
&= \pm \sqrt{0.5185^2 + (1.96 \cdot 0.1710)^2} = \pm 0.6174
\end{aligned}$$

$$u = \bar{X} \pm U_{ADD}, \quad u = \bar{X} \pm U_{RSS} \quad \text{로부터,}$$

약 $\pm 0.5\text{pixel}$ 이 PIV측정시스템의 계측의 불확실성으로 판단된다. 이 값은 Tomimatsu 등⁽⁴⁾의 연구 성과를 참조하여 본 연구에서 얻어진 값인 $\pm 0.25\text{pixel}$ 의 약 2배임을 알 수 있다. 이 값을 기준으로 하여 PIV 소프트웨어, 영상입력장치(디지털카메라를 사용할 경우), 영상그래버, 광원

(레이저)에 의한 영향을 상대적으로 평가하여 보면 전체 오차 중 60%정도가 영상그래버, 20%정도가 광원(레이저), 15%정도가 PIV 소프트웨어, 5%정도가 카메라(디지털)에 의한 영향으로 나타났다.

5. 결론

전술의 PIV 시스템 전체에 대한 계측불확실성에 대한 분석의 요지는 다음과 같다.

1) 전체 시스템의 계측오차 중 영상그래버에 의한 영향이 가장 크며, 다음으로 광원(레이저), PIV소프트웨어, 카메라(디지털)의 순으로 영향을 미치게 된다.

2) 이미지 그래버를 선택함에 있어 Interlace방식보다는 Full Frame 방식을 선택하는 것이 영상의 질(質)저하를 최소화할 수 있으며, 현재 추세는 고해상도 고성능의 카메라가 사용되는 상황이므로 카메라에 내장되어 있는 메모리를 사용할 경우 이미지 그래버에서 발생하는 불확실성은 고려하지 않아도 된다.

3) 유동장에 대하여 육안으로 보아 입자가 잘 관찰되는 광원의 세기정도면 세기의 미세조정에 따른 계측성능의 향상은 적으므로 카메라에 대한 광원의 적절한 밝기만 확보된다면 최적의 광원세기로 보면 된다.

4) 입자추적영상계(PTV : Particle Tracking Velocimetry)의 경우 기본적으로 사용되는 장비는 PIV와 동일하다.

PTV중에서도 3차원 공간을 인식시키기 위한 3D PTV의 경우는 일반적인 PIV/PTV의 단면광원과는 달리 체적광원을 사용하게 되는데, PIV에서 고려된 광원의 불확실성보다 Tomimatsu 등⁽⁴⁾의 연구 결과를 토대로 2배 정도 높게 책정하였으므로 PIV의 불확실성을 그대로 적용하여도 무방하다.

다만, 3D PTV의 경우는 공간을 인식시키기 위한 보정작업이 필요한데 이 과정에서 발생할 수 있는 불확실성은 다음 장에서 서술하고자 한다.

5) PIV 시스템에 대한 불확실성 해석을 수행함으로써 최적의 PIV/PTV 시스템을 구축할 수 있었으며, 이 시스템을 바탕으로 새로운 4D PTV 및 FSIMS을 성공적으로 구축할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Willert, C. E. and Gharib, M., "Digital Particle Image Velocimetry", Experiments in Fluids, 1991, Vol. 10, 181-193.
- (2) Okamoto, K., Nishio, S., Saga, T. and Kabayashi, T., "Standard Images for Particle-Image Velocimetry", Meas. Sci. Technol., 2000, Vol. 11, pp.685-691.
- (3) 도덕희, 성재용, 황태규, 박천수, "표준영상을 이용한 PIV 시스템 측정오차 분석", 한국가시화정보학회 추계학술대회 특별세션(PIV기술과 표준워크숍) 논문집, 한국해양대, 2004. 11. 19, pp.12-21.
- (4) Tomimatsu, S., Fujisawa, N. and Kiuchi, M., "Uncertainty Analysis

- of PIV Measurement of Flow Luminous Flame using Artificial Image”, Proc. of ISFV11, Notre Dame, Aug. 9-12, 2004, CD-ROM paper No.220.
- (5) ANSI/ASME MFC-2M-1983, “Measurement Uncertainty for Fluid Flow in Closed Conduits”, ASME-United Engineering Center, New York, pp.1~55.
 - (6) Hart, D.P., 2000, PIV Error Correction, Experiments in Fluids, 29, 13-2.
 - (7) Keane, R.D. and Adrian, R.J., 1992, Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images, Applied Sci. Res., Vol. 49, 191-215.

감사의 글

학부과정 때부터 약 8년간의 실험실 생활은 저에게 정말 많은 것을 보고, 배우고, 느끼게 해준 소중한 시간들이었습니다. 8년이라고 하나 개인적으로 아직 부족한 것이 많기에 아쉽기만 합니다. 좁은 실험실 공간에서 기쁨과 슬픔, 어려움, 힘든 일들을 함께 나누며 동고동락했던 모든 실험실 사람들이 가장 큰 저의 재산이자 보물입니다.

‘박사학위란 하나의 연구테마를 완성해서 그 가치가 발하게 된다는 의미보다는 앞으로 어떠한 형태의 연구에도 임할 수 있는 자격의 의미’라는 점에서 저에게는 멀리 달려갈 수 있는 에너지를 쌓아 둔 것 같은 느낌이 있습니다. 다가오는 미래에 어떤 형태의 도전에도 지금까지의 자세로 잊혀지지 않기를 자신에게 약속해봅니다.

지금은 연구년 중이시지만 학부과정, 석사, 박사과정에 이르기까지 학문적 소양을 갖추도록 이끌어 주신 도덕희 교수님, 그리고 박사학위논문이 완성되기까지 지도해주신 김의간 교수님, 학문적 소양을 넓히는데 많은 도움을 주신 조효제 교수님, 정재현 교수님, 강신영 교수님, 박권하 교수님께 감사의 마음을 전합니다. 또한, 본 논문의 완성이 있기까지 저의 학문적 소양을 넓히는 데 많은 도움을 주신 기계공학과 및 냉동공조공학과 교수님들께도 감사의 마음을 전합니다. 저를 가르쳐 주신 모든 분들이 다 저에게는 소중한 스승이십니다. 그 분들 모두에게도 감사의 마음을 전하고자 합니다.

본 논문이 있기까지 여러 가지로 큰 힘이 되어준 조경래 박사님, 힘이 들 때 많은 용기를 주신 백태실 교수님과 이재민 과장님께 감사를 드립니다.

바쁜 회사일 속에서도 저에게 많은 것을 배려해준 편용범, 조용범, 새로이 옮긴 실험실에서 동고동락한 박천수에게도 감사를 드립니다. 취업을 해서 자리를 잡았음에도 나의 일을 자신의 일처럼 배려해주고 챙겨주는 친구 같은 선배 장규섭, 지금은 일본에서 유학중인 이원제에게도 감사의 마음을 전합니다. 호주에서 열심히 땀흘리며 꿈을 향해 도전하고 있는 우장덕에게도 원하는 일들이 이루어지기를 기원합니다. 지금은 자신의 꿈을 펼치기 위해 실험실을 벗어난, 지난 1년 여간 모든 실험을 함께 행하였던 후배 최주호군에게도 감사의 마음을 전하며, 반드시 소원성취하기를 기원합니다. 멀리 중국에서 새로이 한의학과에 입학한 미래의 한의사가 될 동기 차규한, 대우일렉트로닉스에서 열심히 연구에 몰두하고 있을 동기 문지섭에게도 반드시 원하는 일들이 이루어지기를 간절히 기원합니다.

일본에서 함께 실험을 하는데 직접적으로 많은 것을 조언해주시고 도와주시며, 후배의 앞날을 진심으로 걱정해주시는 홍성대 박사님께도 진심으로 감사의 마음을 전하고자 합니다.

지금 엘지전자에 입사하여 열심히 일하고 있을 후배 방윤석, 상지웅과 고향에서 취업준비에 여념이 없는 후배 신동진에게도 감사의 마음을 전하고자 합니다.

이 지면을 빌려 일일이 열거를 할 수 없지만 저에게 많은 힘이 되어 주신 가족, 친지, 친구. 동기에게도 감사의 마음을 전합니다.

학위 중에 결혼을 하게 되어, 신혼여행조차 함께 가지 못하고, 늘 바쁘다는 말로 신혼의 달콤함을 느껴야 할 아내 재민에게 서운한 마음만 느끼게 하여, 항상 미안한 마음이 떠나질 못했습니다. 이 지면을 통해 사랑스럽고 현명한 아내에게 그 동안에 받았던 서운함에 부족하나마 위안을 드리고자 합니다. 또한 먼 미래에 태어날 아이와 아내에게 부끄럽지 않는 아버지와 남편이 될 것을 약속드립니다.

지금 박사논문 준비에 여념이 없으실, 결혼을 허락해주신 장모님께 감사의 마음을 드리고자 합니다.

늘 마음속 깊이 격려를 해준 동생과 제수씨에게도 감사의 마음을 전하며, 조카 황혜주에게도 이쁘게 자라나기를 간절히 바랍니다.

마지막으로 저의 결정을 끝까지 존중해주시고 지금에 오늘에 이르기까지 힘드신 기색없이 저를 보살펴주시고 결혼을 허락해주신 부모님께 감사의 마음과 함께 저의 결실을 드리고자 합니다.

2005년 7월 일
아치섬에서
황태규 배상